Nancy-Université
Université Henri Poincaré

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

➢ Contact SCD Nancy 1 : theses.sciences@scd.uhp-nancy.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

THESE

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARE, NANCY I

Spécialité : Sciences du bois

Présenté par

Alexandre ROUGIE

Analyse et conception d'un outil de coupe pour la valorisation des sous produits d'élagage des haies. Démarche intégrée d'innovation et de prototypage.

Date de la soutenance : 22 juin 2009

JURY

Président du jury :	
M. PETRISSANS	Professeur, Université Nancy 2
Rapporteurs :	
P. MARTIN	Professeur, ENSAM Metz
P. ROUSSEAUX	Professeur, Université de Poitiers
Examinateurs :	
C.BACHMANN	Directeur, NOREMAT
Directeur de thèse :	
Pr. Pascal TRIBOULOT	Professeur, ENSTIB
Co-directeur de thèse :	
Dr. Pierre-Jean MEAUSOONE	Maître de conférences, ENSTIB

A ma famille, passée, présente et à venir…

« La masse volumique apparente est,
comme son nom l'indique, le rapport entre
la masse de bois apparent et le volume
apparent de cette masse. »

L'auteur

REMERCIEMENT

Si ce long travail a pu aboutir, je le dois aussi à plusieurs personnes. Ces quelques lignes sont pour elles, qu'elles y trouvent ma reconnaissance.

Tout d'abord ces remerciements vont à l'entreprise NOREMAT qui m'a accueilli durant plus de trois ans. Un grand merci à Christophe BACHMANN pour son accueil, son dynamisme et sa volonté avec une pensée particulière pour les personnes du BE d'une société « extra – ordinaire ». Merci d'avoir cru au vosgien qui voulait mettre du bois partout…

Naturellement mes remerciements vont également à l'équipe de recherche du LERMAB en la personne de Pierre-Jean MEAUSOONE et celle de Pascal TRIBOULOT, pour leur expérience scientifique et leur soutien. Là aussi, une pensée toute particulière pour l'excellente équipe de thésard présente sur le site de l'ENSTIB.

REMERCIEMENT

J'adresse ma reconnaissance à Patrick ROUSSEAUX et Patrick MARTIN pour avoir examiné mon travail et pour leur apport scientifique.

Une thèse n'en serait pas une sans le soutien d'amis qui m'ont apporté le soutien scientifique, philosophique et logistique dont j'avais besoin au moment ou j'en avais besoin. Guillaume, Claude, Rami, Famille GAUVENT et LAUFFER, et les autres, recevez ici l'expression de ma gratitude.

Mes pensées les plus sincères vont vers la personne qui m'apporte chaque jour l'envie d'accomplir des choses, la volonté d'avancer toujours plus vite et plus loin, et surtout la joie de fonder une famille.

Cette dernière ligne est pour ceux que j'ai oublié, ils ont également mes sincères remerciements.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1. INTRODUCTION 11

1.1 Le contexte environnemental de l'étude – gestion des déchets 13

1.2 Le partenariat CIFRE 15

1.2.1 Le Laboratoire d'Etude et de Recherches sur la Matériau Bois 15
1.2.2 L'entreprise NOREMAT 16
1.2.3 Un partenariat de fort potentiel 18

1.3 La problématique de l'étude 18

1.3.1 Les attentes de l'entreprise NOREMAT 18
1.3.2 L'organisation de l'étude 19
1.3.3 L'organisation du mémoire 19

1.4 Un métier nouveau : l'accoroutage 21

1.4.1 Considérations générales 21
1.4.2 Le marché français du fauchage – débroussaillage 22
1.4.3 Les machines actuelles d'élagage des haies 24

1.5 De l'exploitation forestière à la valorisation des déchets 27

1.5.1 La filière bois française 27
1.5.2 Valorisation des déchets bois issus des haies 29
1.5.3 Positionnement de NOREMAT auprès de la filière bois énergie 30
1.5.4 Cahier des charges de NOREMAT pour la conception du nouvel outil 32

CHAPITRE 2. APPROCHE DES HAIES FRANÇAISES ET DE LEUR VALORISATION EN BOIS ENERGIE 33

2.1 L'organisation de la haie et du bocage 35

2.1.1 Diversité du bocage français 36
2.1.2 Aspects historiques 37
2.1.3 Gestion de l'entretien 38
2.1.4 Production 39

2.2 Méthodes d'estimation quantitatives des haies françaises 39

2.2.1 Méthode d'analyse cartographie de J.BAUDRY 39
2.2.2 Inventaire Forestier National 41
2.2.3 Elaboration d'une méthode d'estimation du linéaire français à partir des données de l'IFN 42
2.2.4 Méthode de détermination de l'importance des haies dans les départements français 44
2.2.5 Volume de biomasse valorisable. 45

2.3 Caractérisation qualitative des haies françaises 46

2.3.1 Méthode de J.BAUDRY 46
2.3.2 Inventaire d'essences 48
2.3.3 Croissance annuelle des haies 50
2.3.4 Situation juridique des haies et de ses déchets 51

2.4 Caractérisation physique des haies françaises 52

2.4.1 Caractéristiques physiques - Flexion 52
2.4.2 Caractéristiques physiques - Mesures sur chantier 55

2.5 Adaptation de la biomasse bocagère à la valorisation en bois énergie 58

2.5.1 Présentation des chaudières automatiques de faibles puissances 59
2.5.2 Caractéristiques des combustibles fragmentés pour ce type de chaudière automatique 60
2.5.3 Comparaison avec les produits connexes issus de l'élagage des haies 62

SOMMAIRE

2.6 Conclusion du chapitre 63

CHAPITRE 3. LA PRODUCTION DE COPEAUX ET DE PLAQUETTES PAR COUPE ROTATIVE DU BOIS 65

3.1 La fabrication de copeaux traditionnels 67

3.1.1 Généralités scientifiques à propos de l'usinage du matériau bois 67
3.1.2 Modes de coupe : 68
3.1.3 Géométrie de coupe 71
3.1.4 Qualité d'état de surface 71
3.1.5 Efforts de coupe 72
3.1.6 Formation du copeau 73
3.1.7 Paramètres d'usinage : facteurs liés au bois 77
3.1.8 Paramètres d'usinage : facteurs liés à la coupe 79
3.1.9 Paramètres d'usinage : facteurs liés à l'outillage 81

3.2 Les outils producteurs des plaquettes de chauffage 83

3.2.1 Les broyeurs forestiers 83
3.2.2 Le canter de scierie 89

3.3 Conclusion du chapitre 90

CHAPITRE 4. CONCEPTION ET PRESENTATION DU NOUVEAU SYSTEME DE COUPE 93

4.1 Méthodologies d'innovations 95

4.1.1 L'innovation dans les entreprises et à NOREMAT 96
4.1.2 Méthodologie retenue 97
4.1.3 Diagnostic du projet d'innovation 98
4.1.4 Analyse des pré-requis 98
4.1.5 Le degré de préparation et connaissance de l'entreprise 98
4.1.6 Les compétences et la capacité de mise en œuvre du projet : 99
4.1.7 Analyse des Risques d'innovation 99

4.2 Cahier des charges fonctionnel de l'outil 100

4.2.1 Le produit et ses objectifs 100
4.2.2 Le contexte du projet 100
4.2.3 Diagramme BÊTE A CORNE 101
4.2.4 Description des fonctions 101
4.2.5 Environnement 104
4.2.6 Ordonnancement des fonctions 104

4.3 Recherches de solutions pour les fonctions principales 105

4.3.1 Inventaire des outils de coupe 105
4.3.2 Sélection du concept de coupe 106

4.4 Présentation de l'outil de laboratoire 106

4.4.1 Présentation générale 107
4.4.2 Etude mécanique de l'outil 110

4.5 Analyse des conditions de coupe de l'outil de laboratoire 113

4.5.1 Utilisation de l'outil – modes de coupe 113
4.5.2 Formation du copeau – efforts de coupe 114
4.5.3 Cas particulier de la coupe en avalant 115
4.5.4 La captation des copeaux formés 116

4.6 Conclusions 118

SOMMAIRE

CHAPITRE 5. ESSAIS DE COUPE ET DE BROYAGE DES BRANCHES EN LABORATOIRE 119

5.1 Objectifs – Protocole expérimental 121

5.1.1 Analyse des paramètres influant la coupe des branches 121
5.1.2 Protocole expérimental 122

5.2 Matériels et méthodes 125

5.2.1 Description du banc d'essais de laboratoire 125
5.2.2 Méthodes de mesures 128

5.3 Observations et résultats expérimentaux 130

5.3.1 Capacité de coupe, vitesse de rotation 131
5.3.2 Observations granulométriques 133
5.3.3 Résultats de mesures de puissances 137
5.3.4 Résultats d'observations de coupe 140
5.3.5 Observations diverses 142

5.4 Conclusions 143

5.4.1 Validation du principe de fonctionnement 143
5.4.2 Principes de coupe retenus 143

CHAPITRE 6. VALIDATION DU CONCEPT DE COUPE PAR PROTOTYPAGE INDUSTRIEL ET ESSAIS 145

6.1 Présentation du prototype 147

6.1.1 Cahier des charges 147
6.1.2 Présentation générale 149

6.2 Etude mécanique 151

6.3 Essais de coupe 154

6.3.1 Montage et fonctionnement de l'outil 154
6.3.2 Essais et résultats 155

CHAPITRE 7. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 165

7.1 Bilan pour l'entreprise 167

7.2 Bilan scientifique 168

7.3 Perspectives de travaux 169

CHAPITRE 8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 171

SOMMAIRE

Chapitre 1. INTRODUCTION

1.1

Le contexte environnemental de l'étude – gestion des déchets

C'est un sujet qui a fait couler beaucoup d'encre ces dernières années : la prise de conscience des enjeux environnementaux a fortement progressé et ce, au niveau mondial. Des thèmes comme le changement climatique, l'érosion de la biodiversité ou les liens entre pollutions et santé sont maintenant sur le devant de la scène et ne peuvent plus être ignorés des processus décisionnels, du niveau local au niveau planétaire. Des actes aussi emblématiques que l'intégration de la « charte de l'environnement dans la constitution » en 2004 [1] ou l'établissement du « grenelle de l'environnement » en 2007 [2] participent à cette maturation devenue essentielle. Cette réflexion ne peut être ignorée par l'ensemble des français. Que ce soit pour se déplacer, pour se chauffer, à des fins professionnelles ou privées, l'énergie, celle d'origine fossile en particulier, possède désormais un coût non négligeable (Figure 1).

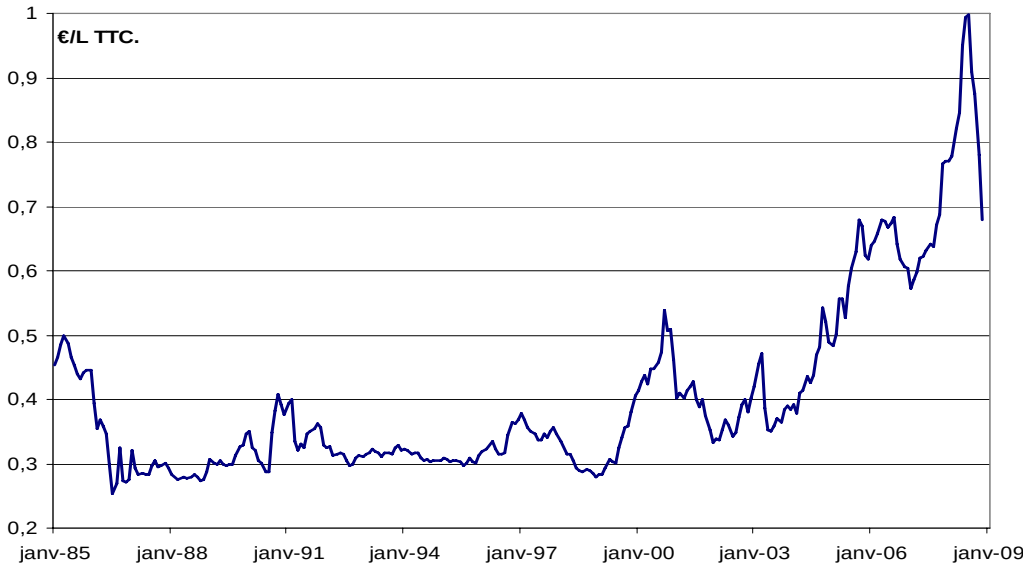


Figure 1 : Evolution du prix du fioul domestique en France de 1985 à 2008 [3]

Économiser le carbone fossile impose à notre société des changements profonds afin de maîtriser la consommation d'énergie, et cela passe par la production d'énergie renouvelable et la réduction de la consommation des énergies fossiles. En ce qui concerne la production, la France est déjà dotée d'un système de production d'énergies thermiques à base de biomasse conséquent (78% de l'énergie thermique des ENR) (Figure 2):

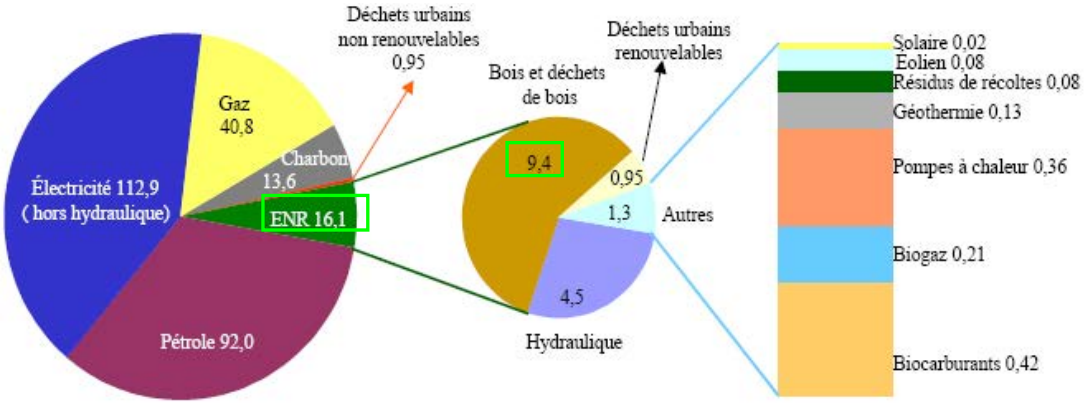


Figure 2 : Répartition des énergies nouvelles renouvelables (ENR) en 2005 en France (Mtep) [DGEMP;4]

Cela s'observe sur le graphique précédent, le bois et les déchets à base de bois occupent une place primordiale dans la production d'énergie propre et principalement d'énergie thermique. De nos jours, les Français consomment chaque année 40 millions de m^3 de bois énergie, ce qui représente l'équivalent de plus de 9 millions de tonnes de pétrole (tep) [DGEMP/4]. De cette quantité, 25 millions de m^3 sont fournis par l'exploitation forestière. Les 15 millions restant proviennent des sous-produits de l'industrie du bois ou d'exploitations rurales. Les relevés sur le terrain de certains experts de l'Inventaire Forestier National montrent que si l'on valorise mieux la ressource, il serait possible d'obtenir une ressource de 9 millions de m^3 supplémentaires par an issus uniquement des travaux ruraux (Figure 3). Par travaux ruraux on entend tout travail d'entretien sur toute parcelle produisant de la biomasse ligneuse.

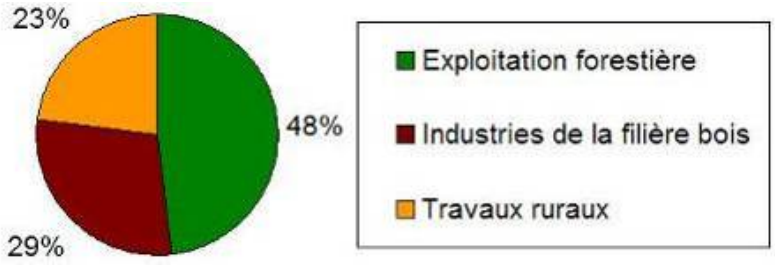


Figure 3: Répartition des ressources envisageables en sous produits bois en France en 2005 [IFN/5]

Le deuxième axe de réflexion dans cette politique environnementale sera la réduction des consommations des énergies fossiles. Cette philosophie, que chacun essaye de mettre en place au jour le jour, est également un formidable atout commercial pour la vente de machines consommatrices d'énergie. Les entreprises n'hésitent plus à mettre en avant un véhicule plus propre, une machine outil moins gourmande…Si le développement durable se caractérise par le souci des générations futures, il intègre également les aspirations des générations actuelles pour lesquelles l'environnement peut être source de bien-être. Les aménités environnementales (un beau paysage, une bonne qualité de l'air, des

espaces verts) participent à la qualité et au cadre de vie des populations. Ces biens environnementaux sont une valeur en soi et contribuent à l'activité économique même s'ils ne donnent lieu à aucune transaction marchande. Pour conclure, aujourd'hui plus que jamais, l'environnement n'est plus l'affaire de quelques secteurs ciblés, il est l'affaire de tous.

Il est également l'affaire du monde industriel qui, comme l'entreprise NOREMAT, y voit une opportunité de développement pour les années futures. Ainsi, considérant que ce mouvement de prise de conscience est important, ce fabricant de machines agricoles a souhaité renouveler sa gamme d'outils afin de les rendre plus modernes et donc plus en accord avec ces idées. C'est une des priorités de NOREMAT depuis plusieurs années déjà que d'obtenir une NOuvelle REntabilité des MATériels…

1.2 Le partenariat CIFRE

1.2.1 Le Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois

Le LERMAB est un laboratoire de recherches spécialisé sur le matériau bois dans toute sa diversité. Il est composé de plusieurs groupes de travail portant chacun sur un domaine particulier. Au sein du groupe génie civil/mécanique/usinage se situe l'équipe de recherche sur l'usinage du matériau bois. Ses travaux sont ciblés sur la compréhension et la maîtrise des conditions de coupe au cours de l'usinage du bois. Le but final de ce type de recherche est de posséder un pouvoir décisionnel quant à l'utilisation de telles ou telles conditions de coupe dans un procédé de fabrication de produits bois. Par produits bois on entend tout élément issu d'une transformation mécanique du matériau. De cette manière, on retrouve le thème principal de recherche « Le Couple Outil Matière » dans toute la filière de transformation du bois (foresterie, scierie, ameublement…).

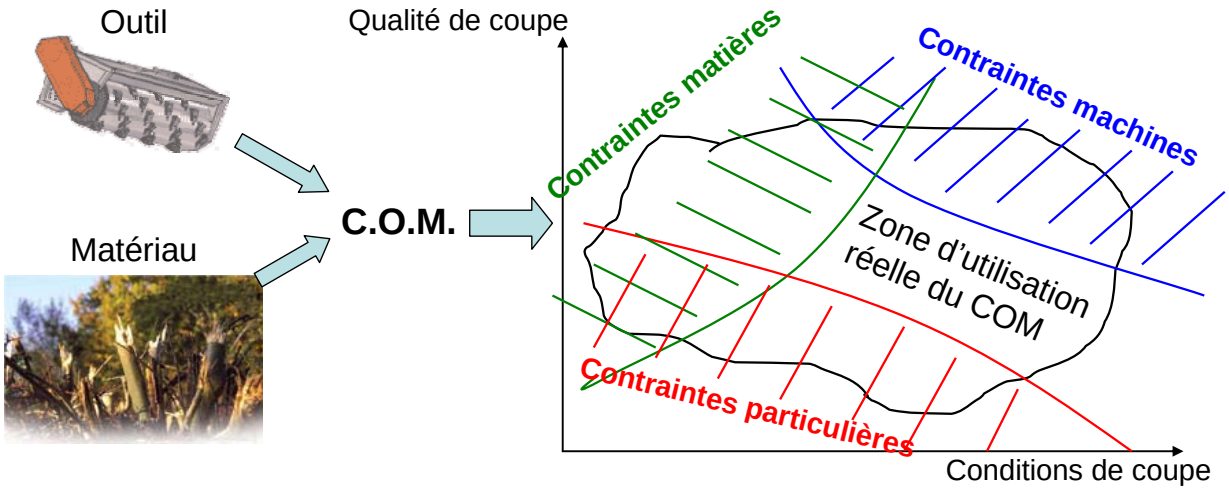


Figure 4 : Principe de fonctionnement du Couple {Outil-Matière} [adapté de NORME E66-520-1 ;6]

Le concept est de placer un outil dans un domaine d'application acceptable. Avec le COM on ne cherche plus à définir le point précis pour atteindre une application optimale mais toutes les limites d'utilisation d'un outil. Le COM prend en compte tous les paramètres gravitant autour de l'outil. C'est donc une démarche qui demande à être enrichie sans cesse.

Les installations du laboratoire autorisent des activités à la fois expérimentales et de modélisation. Les thèmes produits au sein de l'équipe de recherche peuvent être aussi variés que notre problématique: broyage de plaquettes forestières, tenue des lames de scies circulaires à haute vitesse, reconnaissance et analyse des défauts sur du placage bois… Au travers de ces thèmes, les trois domaines que sont la pièce de bois, l'outil et la machine sont étudiés afin d'en déceler les multiples interactions.

1.2.2 L'entreprise NOREMAT

Dire que l'entreprise NOREMAT est un constructeur de machines d'entretien des paysages serait parfaitement juste mais néanmoins restrictif. Sur l'ensemble du marché des machines d'entretien des paysages (voir paragraphe 1.4) l'entreprise a tout d'abord une activité de services avec à la fois un rôle de maintenance générale des matériels en fonctionnement (fournitures de pièces de rechange, réparations sur sites, révisions…) et un rôle de conseil et de formation pour ses clients. La deuxième activité de l'entreprise est celle de concepteur assembleur de matériels : le bureau d'études conçoit les modèles de bras hydrauliques et de groupes de fauchage/élagage puis l'atelier de production assemble les machines (aucune pièce n'est fabriquée dans les locaux de NOREMAT). Une des stratégies de l'entreprise est de livrer et de mettre en route elle-même ces matériels chez ses clients. Parallèlement à son activité de constructeur, NOREMAT distribue également des matériels dits de "négoce", fabriqués par des partenaires français ou étrangers. Cette activité de distribution de matériels est complémentaire à la gamme NOREMAT. Ainsi l'entreprise est le distributeur exclusif de la gamme de broyeurs de bois de la marque allemande JENZ.

L'entreprise NOREMAT a été créée en 1981 par Jacques BACHMANN et avait pour but, dans un premier temps, le service après vente des machines d'entretien de bords de route dans l'est de la France. Aujourd'hui l'entreprise, qui a été reprise par le fils de son créateur Christophe BACHMANN compte près de 150 personnes et est présente partout en France et se développe à l'étranger (Figure 5).

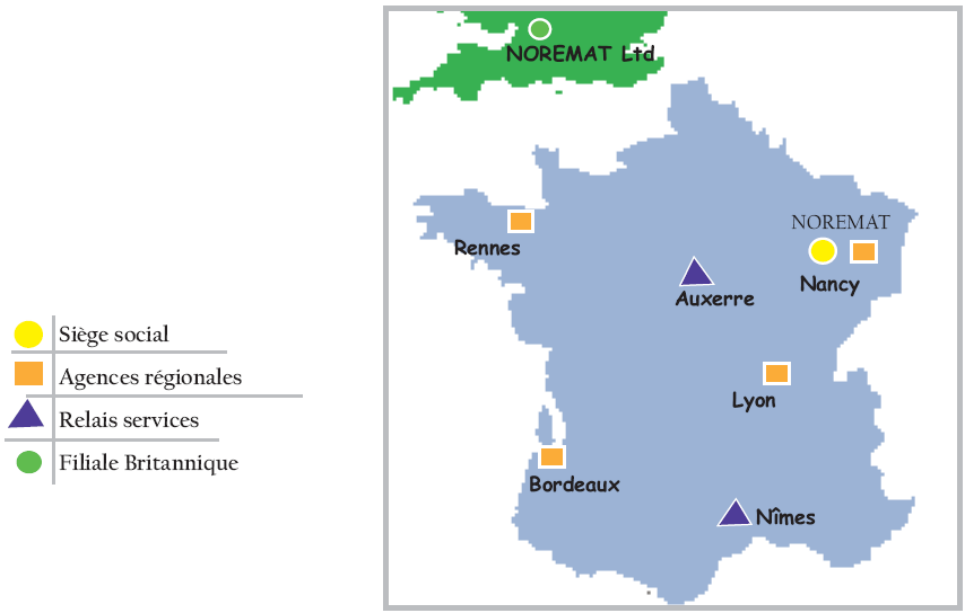


Figure 5 : Emplacement des antennes de l'entreprise NOREMAT à l'heure actuelle

L'entreprise NOREMAT est le seul constructeur 100% français sur le marché face au groupe américain ALAMO qui possède la plupart des autres enseignes présentes sur le territoire (dont les entreprises ROUSSEAU et SMA) (Figure 6). L'entreprise NOREMAT est donc une entreprise jeune, dynamique, leader sur le marché français dans son domaine avec la réelle volonté de le rester. Dans ce but, l'entreprise met tout en œuvre pour innover dans le domaine qui est le sien : chaque nouvelle machine propose des améliorations par rapport aux précédentes et aux concurrentes et l'entreprise dépose régulièrement des brevets (une vingtaine à ce jour). Toujours dans ce but, l'entreprise souhaite améliorer les outils de coupe actuels afin de répondre aux attentes des clients en matière d'efficacité et d'économie.

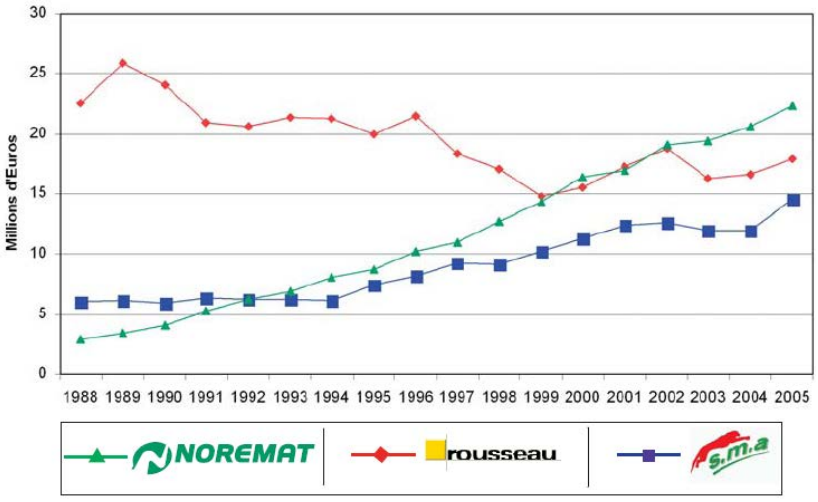


Figure 6 : Evolution du chiffre d'affaires des trois principaux fabricants français de machines d'entretien de paysages [NOREMAT ;7]

1.2.3 Un partenariat de fort potentiel

Une thèse en contrat CIFRE est la mise en relation d'un besoin industriel avec une structure universitaire par le biais d'un étudiant/chercheur. L'entreprise NOREMAT a contacté le laboratoire avec un réel besoin industriel qui est la conception et la mise sur le marché d'un nouvel outil de coupe pour l'élagage des haies de bords de route. D'ordinaire, l'entreprise utilise son bureau d'études et les compétences présentes pour effectuer ses recherches et développements. Pour cette fois, elle a décidé de faire appel à l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois. Via ce partenariat, l'entreprise dispose des moyens humains (doctorant, équipe encadrante…), des connaissances techniques bois (chercheurs présents au LERMAB) et des moyens techniques (machines d'essais, locaux, bureaux…) que peut disposer une entité telle que l'ENSTIB et le LERMAB. L'entreprise, quant à elle, fournit la problématique, les connaissances et l'expérience qu'elle possède dans son domaine ainsi que les moyens financiers pour que le laboratoire avance et produise une recherche de qualité. Au milieu de tout ceci, le doctorant possède une double étiquette avec un pied dans l'industrie et un autre dans la recherche. Partant de ce constat, il évolue à la frontière commune de ces deux mondes aux réalités et aux contraintes bien différentes. Son statut et ses prestations changent en fonction de l'avancement de son projet, ainsi que sa place et son rôle au sein de l'entreprise.

1.3 La problématique de l'étude

1.3.1 Les attentes de l'entreprise NOREMAT

En tant que constructeur de machines d'entretien de bords de route, l'entreprise NOREMAT est, comme tout le monde, soumis aux lois de la concurrence. L'entreprise est également consciente des enjeux écologiques et économiques qui régissent son métier. Partant de ce constat, il a été décidé de concevoir un nouveau type de machine, réellement innovant dans le domaine. Du fait du partenariat CIFRE avec le LERMAB, il a été convenu que cette machine serait chargée du traitement de la matière ligneuse présente sur les bords de route et de chemin : autrement dit, les haies et autres bocages. Les machines existantes dans ce domaine (Paragraphe 1.4.3) sont, la plupart du temps, très efficace mais, sans doute faute de mieux ou par habitude, ont également d'innombrables défauts. Elles peuvent être dangereuses pour l'utilisateur et pour son entourage (lamier à scies circulaires), lentes (sécateur), bruyantes et demandent beaucoup d'énergie de fonctionnement.

De ce fait, le challenge est de taille, il s'agit de concevoir une machine qui, naturellement, soit efficace et qui ne soit pas entachée de tous ces défauts. Seulement, les deux seules qualités que sont la sécurité et l'efficacité peuvent être considérées par certains comme déjà acquises par les machines actuelles. La solution est de proposer aux clients NOREMAT une machine possédant une fonction supplémentaire : la valorisation des déchets issus des haies entretenues. En effet, pour des soucis de

coût et d'encombrement, les déchets d'entretien des haies de bords de route sont actuellement laissés dans les talus. Toute cette biomasse n'est, pour le moment, pas rentabilisée. L'idée est donc de proposer une machine innovante aux clients de NOREMAT, en justifiant une machine plus innovante par des meilleures caractéristiques et surtout la possibilité de revendre les produits d'élagage. Il serait alors question de proposer une sorte de « pack valorisation » au moment de la vente de la machine, les conditions de coupe et les accessoires pour transformer les branches et la filière pour écouler ce produit.

1.3.2 L'organisation de l'étude

La compréhension et l'analyse d'un sujet de thèse définissent une étape primordiale et nécessaire à tout début de recherche. Le sujet de la thèse constitue le fil directeur de la problématique de recherche et il n'est pas rare de le voir évoluer au cours des trois ans. Dans notre cas, nous sommes devant un sujet tout particulier puisqu'il s'agit d'une conception de produit nouveau. Une analyse automatique a donc été admise avec un système de boite noire : l'objet à concevoir est le système et afin de savoir quelles vont en être les caractéristiques, nous devons étudier ce qui y rentre et ce que nous voulons en faire sortir (Figure 7) :

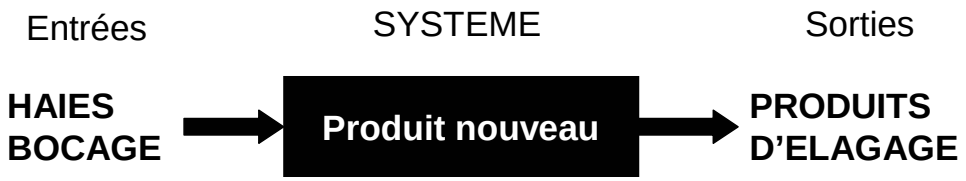


Figure 7 : Schéma de transfert du produit à concevoir

Partant de ce constat, la résolution de la problématique consiste tout d'abord à étudier le bocage français dans un but de caractérisation et de quantification. La seconde étape est de connaître les devenirs possibles des produits sortants de la boite noire, d'en choisir un ou plusieurs et ainsi prévoir la conception de la boite noire afin de faciliter cette transformation.

1.3.3 L'organisation du mémoire

Ce mémoire va présenter de façon synthétique la démarche que l'on a adoptée afin de résoudre la problématique industrielle avec un ensemble de moyens scientifiques disponibles.

Après ce chapitre d'introduction, le chapitre 2 est consacré à la présentation synthétique de l'étude de marché du futur outil de coupe. Il s'agit d'une étude préliminaire bibliographique nécessaire afin de mieux cerner le produit à couper : la haie. En effet, mes compétences et celle du LERMAB sont d'avantage orientées vers les premières et secondes transformations du matériau bois. Les domaines que sont la sylviculture, l'exploitation forestière et l'entretien des végétaux dans le domaine agricole sont moins abordés. Cette première étape a donc permis à la fois la découverte et l'approfondissement

de certains de ces sujets. Il a tout d'abord été question de mieux cerner le marché de l'entretien des haies françaises. L'organisation du bocage français et son évaluation marketing ont permis la justification à la fois technique et financière de la problématique. Après cette approche globale, une étude plus précise sur les caractéristiques propres des haies a été mise en place.

Nous connaissons désormais mieux le produit que nous devons couper, la haie, et le produit que nous devons obtenir : la plaquette de chauffage. Le chapitre 3 est consacré à l'état de l'art des procédés qui permettrons de la faire : la fabrication de copeaux et de plaquettes dans l'intégralité de l'industrie du bois. Deux grands domaines seront abordés : la formation du copeau en coupe rotative avec la présentation de la multitude de paramètres influençant ce procédé ainsi que la présentation de machines spécialisées dans la fabrication de plaquettes de chauffage. C'est la compréhension des différents phénomènes intervenant lors de la formation de ce copeau afin de produire des plaquettes de chauffage qui nous fera avancer vers la conception de l'outil de coupe.

Vient ensuite l'étape de réelle conception de l'outil avec le chapitre 4. Avant toute chose un état de l'art des méthodologies de conception a permis de choisir celle qui nous a apporté la réponse au concept recherché. Comme toute démarche de conception, un cahier des charges fonctionnel à été rédigé en prenant en compte l'ensemble des contraintes régissant l'usinage. Après avoir défini les fonctions principales que devra remplir le produit à concevoir, une recherche de solution dans les outils de coupe existants à été effectuée afin de trouver le concept de l'outil. Une fois ce concept trouvé, l'outil a été dessiné, fabriqué et testé en CAO puis le prototype de laboratoire est présenté en deuxième partie de ce chapitre. La fin du chapitre est consacrée à une analyse scientifique de la coupe produite par l'outil de laboratoire.

Puis la partie essais en laboratoire (chapitre 5): après une présentation du banc d'essais et de ses possibilités, spécialement conçu et adapté pour la coupe de branches en laboratoire, nous avons observé le comportement de l'outil de laboratoire en rotation à vide et en usinage. Nous avons fait varier les différents paramètres afin de vérifier leurs influences sur la coupe, sur la qualité des branches et sur celle des produits (les plaquettes). Toutes ces observations et mesures ont permis de mieux comprendre la façon de couper de l'outil et la réaction des branches, elles ont servis à concevoir un prototype industriel de l'outil de coupe (chapitre 6). Cet outil, ayant pour vocation le montage sur machine NOREMAT et essais sur des haies grandeur réelle, a donc été conçu en tenant compte des points forts et des points faibles du précédent. Ce chapitre traite également des campagnes d'essais avec les différentes évolutions technologiques du prototype industriel.

Le dernier chapitre, le chapitre 7, est consacré à la conclusion générale des travaux de recherches ainsi qu'aux perspectives que cela ouvre.

1.4 Un métier nouveau : l'accoroutage

1.4.1 Considérations générales

L'« accoroutage » est un terme inventé par la société NOREMAT qui désigne l'ensemble des activités d'entretien des accotements routiers. Ce mot peut alors se décliner en un métier jusqu'alors appelé cantonnier ou paysagiste : les accoroutistes. Ce métier, encore mal connu, possède un domaine d'action bien particulier que sont les accotements de bords de route (Figure 8):

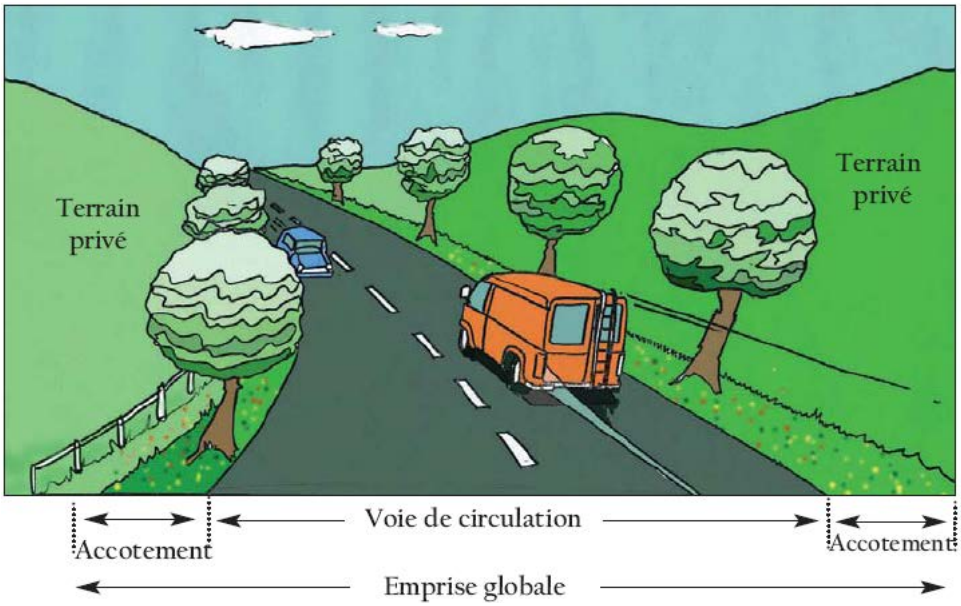


Figure 8 : Exemple de profil de route ou le terrain d'action des machines NOREMAT

A ce jour, on recense en France plus de 5 000 entreprises œuvrant à l'entretien des dépendances vertes. Il y a actuellement 10 000 intervenants en accoroutage [SNACC ;8]. La France constitue un des tous premiers marchés en Europe pour l'entretien des accotements routiers. Ce métier est caractérisé par différentes prestations dont les principales sont les suivantes :

- Le fauchage constitue à réduire en hauteur de la végétation herbacée par des moyens mécanisés (roto faucheuses et tondeuses débroussailleuses à bras articulé) de façon à respecter les objectifs de sécurité avec des qualités de service, d'esthétique et de respect de l'environnement (Figure 9).
- L'élagage ou taille mécanique des végétaux en hauteur, en bordure de voie consiste à éviter leur débordement. Elle est effectuée à l'aide de machines de taille mécanique des végétaux.
- Le broyage consiste à éliminer la végétation d'un diamètre plus important. Cette action est réalisée mécaniquement à l'aide d'un matériel travaillant parallèlement au sol. Ces opérations revenant à couper et broyer la végétation indésirable (roncier, broussaille, rejet

de ligneux) attraient au débroussaillage. La végétation une fois coupée est souvent laissée sur place.

Figure 9 : Utilisation d'une machine de fauchage de bords de routes

L'ensemble de ces prestations est effectué avec du personnel spécialisé, formé à la conduite d'engins, à la sécurité et à la signalisation. Le matériel spécifique doit répondre aux normes européennes de protection. L'entretien des accotements a tout d'abord un but de sécurité pour les usagers de la route (visibilité de la signalisation, de la route et des autres usagers) mais aussi la préservation de la structure de la chaussée (fossés pour l'évacuation des eaux, largeur de la voie…).

Juridiquement, l'Etat et les collectivités sont tenus, au même titre que tout propriétaire privé, d'assurer un entretien de leurs biens, afin de ne pas nuire à la sécurité des voisins immédiats (visibilité, chute de branches, etc.) ni d'entraîner un préjudice à des riverains. Notons au passage que, dans le cas de la coupe des branches, celles-ci doivent être également broyées afin de ne pas encombrer les accotements. Les conditions d'entretien des voies peuvent être très variables selon plusieurs critères :

- Le type de voie (routes, voies ferrées, navigables, chemins forestiers)
- Le climat (l'ouest de la France possède une végétation plus dynamique)
- Le relief (la végétation et les accotements de montagne nécessitent moins d'entretien)
- Le tourisme (les régions touristiques réclament un paysage davantage entretenu)

1.4.2 Le marché français du fauchage – débroussaillage

Afin d'assurer tous les types d'entretien sur tous les types de voies, les clients de la société NOREMAT sont nombreux :

- Les Services de l'Equipement (DDE[1], DiR[2], services routiers divers),
- Les entreprises privées,
- Les mairies et SIVOM (Syndicats Intercommunaux à VOcation Multiple),

- Les Voies Navigables de France, l'Office National des Forêts, la SNCF.

Le découpage administratif de la France est ainsi fait que le réseau est tissé par :

- Des autoroutes concédées (privées, elles sont entretenues par des entreprises privées) ou non concédées (appartenant à l'Etat, elles sont entretenues par la DDE),
- Les routes nationales qui sont entretenues par l'Etat (DDE),
- Les routes départementales à la charge du conseil général,
- Les routes communales à la charge de la commune.

En termes de coûts, l'entretien de l'ensemble de ces voies de communications représente une enveloppe annuelle de 176 millions d'euros (source : NOREMAT [7]) (Figure 10).

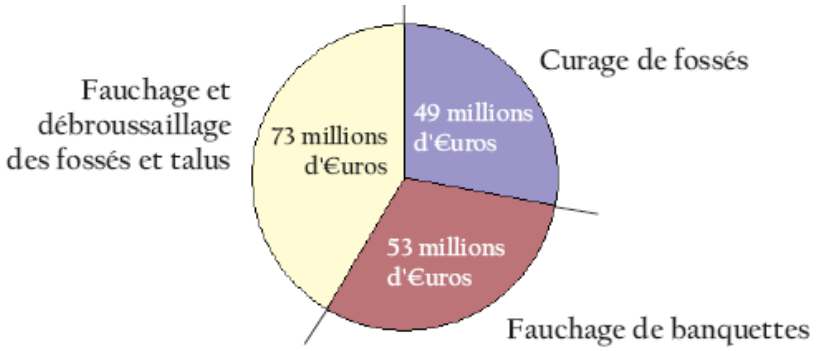


Figure 10 : Répartition du budget de l'entretien des voies de communications françaises (2006)

Sur le plan européen, depuis les années 1980, la France est le pays qui consacre le budget le plus important à cet entretien. Le montant d'un tel budget est dépendant de deux facteurs : tout d'abord la volonté politique d'assurer correctement l'entretien et donc d'allouer un budget correct pour cela, ensuite paysage de bords de route important. Si nous prenons le cas de la Grande Bretagne qui possède un réseau bocagers important : les deux conditions ne sont pas réunies car les budgets d'entretien ont été fortement diminués dans les années 70-80. Pour les Allemands, le problème est différent, tout d'abord le réseau est moins important, ensuite les talus sont plus petits et pour finir, le rôle des fossés est assuré par des tuyaux enterrés. Il est clair que le facteur du budget alloué à l'entretien des bords de route est dépendant d'une activité supplémentaire : le tourisme. La France consacre un budget important à cet entretien pour encourager le tourisme.

1 DDE : Direction Départementale de l'Equipement.

2 DiR : Directions interdépartementales des Routes.

Figure 11 : Machine NOREMAT montée sur tracteur RENAULT en fauche

1.4.3 Les machines actuelles d'élagage des haies

Le principal produit vendu par l'entreprise NOREMAT est un bras hydraulique monté et animé par un tracteur agricole (Figure 11) sur lequel vient se greffer un organe de coupe appelé « groupe » comme le montre le schéma de la Figure 12 :

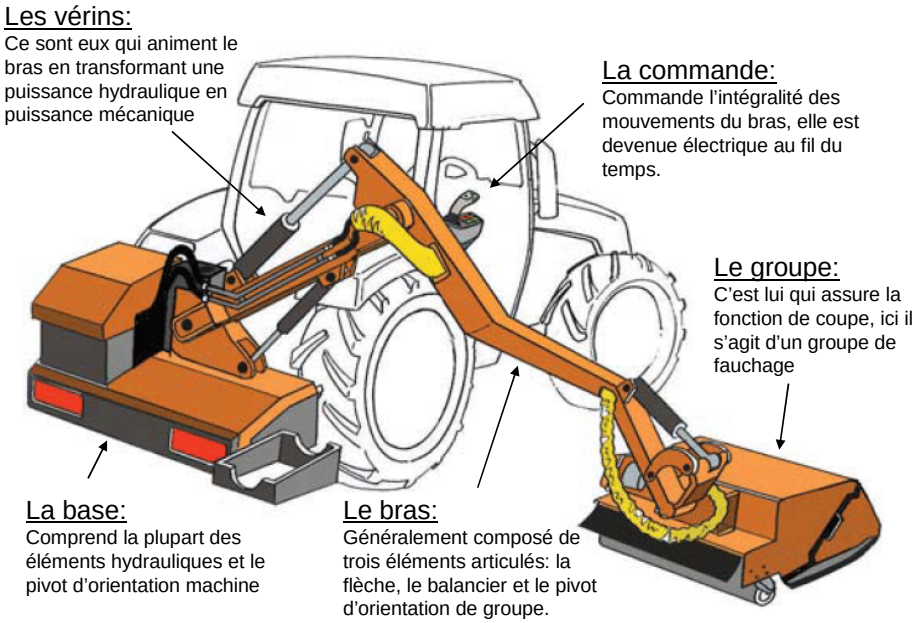

Les vérins:
Ce sont eux qui animent le bras en transformant une puissance hydraulique en puissance mécanique
La commande:
Commande l'intégralité des mouvements du bras, elle est devenue électrique au fil du temps.
Le groupe:
C'est lui qui assure la fonction de coupe, ici il s'agit d'un groupe de fauchage
La base:
Comprend la plupart des éléments hydrauliques et le pivot d'orientation machine
Le bras:
Généralement composé de trois éléments articulés: la flèche, le balancier et le pivot d'orientation de groupe.

Figure 12 : Schéma de fonctionnement général d'un bras hydraulique NOREMAT

Les bras articulés NOREMAT possèdent une portée latérale allant de 4,20m à plus de 10m. Ils sont accouplés à des tracteurs agricoles pesant de 3 à 10 tonnes et développant des puissances de 70 à 190 CV via la prise de force à une vitesse de rotation de 1000 tr/min. Les bras peuvent être équipés d'un déport vers l'avant pour faciliter la vision du chauffeur ainsi que d'un télescopique pour augmenter la

portée. Tous ces paramètres sont à prendre en compte lors de l'élaboration du cahier des charges du futur groupe.

L'outil que l'entreprise NOREMAT veut concevoir doit pouvoir se monter sur ce type de bras. Pour le moment, les groupes utilisés pour le débroussaillage et la coupe des haies de bords de route sont décrits par la suite. La Figure 13 et Figure 14 montre l'outil qui est le plus régulièrement utilisé pour les travaux d'élagage courants : il s'agit d'un rotor sur lequel sont montés des fléaux ou des marteaux suivant le travail à réaliser.

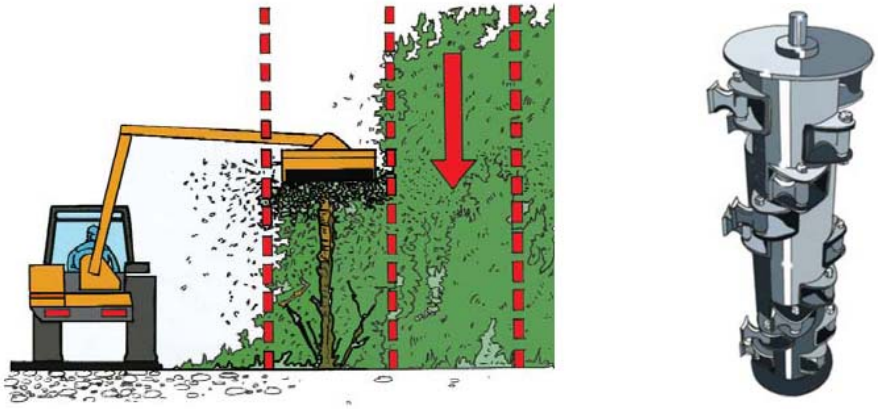


Figure 13 : première solution :
le groupe de débroussaillage monté avec un rotor à marteaux (NOREMAT)

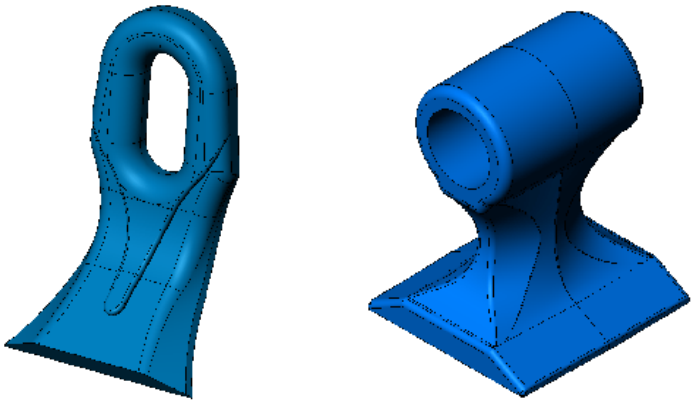


Figure 14 : A gauche : fléau pour les faibles diamètres de branches (max 2cm)
et à droite : marteau pour les diamètres plus importants (pièces NOREMAT)

Ce type d'outil a les caractéristiques physiques suivantes :

- Vitesse de rotation : entre 2300 et 2900 tr/min
- Largeur de coupe : entre 1,20m et 1,60m
- Poids total : entre 280 et 360kg

A l'heure actuelle, le groupe de broyage est la seule solution qui coupe et broie la végétation en un seul passage d'outil. De ce fait, le coût d'entretien s'en trouve réduit. Le principal inconvénient de cette solution est l'état de la haie après réalisation de l'entretien : les branches sont éclatées et non coupées de façon nette, l'aspect esthétique est inacceptable. Sans parler de l'aspect sanitaire pour la haie, car les surfaces de coupe peuvent être des lieux propices au développement de maladie et de champignons (Figure 15). Cette solution est de moins en moins préférée en France à cause de l'état des haies et les collectivités demandent de plus en plus des résultats esthétiquement meilleurs.

Figure 15 : Exemple de l'état de la haie après la passage d'un rotor à fléaux

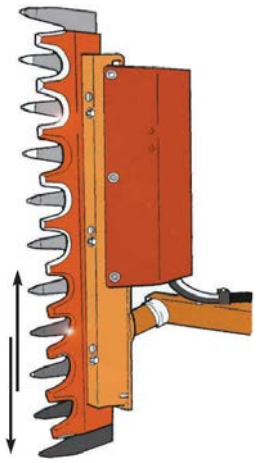
Le lamier (exemple à 4 lames Figure 16) est utilisé pour la coupe de branche allant jusqu'à 20 cm de diamètre et autorise des vitesses d'avance de l'outil importantes (5 km/h). Néanmoins sa fonction se résume à la coupe uniquement et est parfois dangereux en cas de détachement des lames : des accidents ont lieu régulièrement. Il peut être équipé de plateaux à couteaux au lieu des lames pour les branches de petits diamètres (25mm max). C'est un outil très efficace mais les accidents, trop fréquents, sont souvent tragiques.

Caractéristiques techniques (NOREMAT):

- Diamètre des lames : 700 et 900mm
- 96 dents, épaisseur 4mm
- Largeur de coupe : de 0,9 à 2,70m
- Poids : de 190 à 260 kg

Figure 16 : deuxième solution : le lamier, ici à 4 lames

Le sécateur est un outil utilisé pour le rafraîchissement des haies (diamètres des branches inférieurs à 10cm) et n'autorise pas de vitesses d'avance trop élevées (max 2 km/h). Par contre il apporte une qualité de coupe sans égal actuellement grâce à son action de cisaillement. Il est également très silencieux. Il va de soi qu'il ne fait que couper et ne broie pas. C'est pourquoi, après son passage, une deuxième machine, de broyage, doit réduire le volume des branches coupées.



Caractéristiques techniques :

- Largeur de coupe : 1,30m à 2,20m
- Vitesse de coupe : 60 coups/min

Figure 17 : troisième solution: le sécateur

Le matériel utilisé pour l'entretien des haies en bords de route a l'énorme avantage de fonctionner de façon correcte. Par contre, il est souvent nécessaire d'utiliser deux machines l'une à la suite de l'autre : une pour couper et l'autre pour broyer les branches tombées, ce qui engendre des surcoûts. Un chantier d'élagage est souvent organisé de la façon suivante : un premier tracteur passe avec le lamier (Figure 16) afin de rafraîchir la haie sur sa longueur et sa hauteur, des opérateurs ramassent les branches tombées à terre et les remettent dans le fossé. Là, un deuxième tracteur passe muni d'un groupe de broyage type rotor à marteau (Figure 13) et broie les branches dans le fossé. Pour le moment, les collectivités possèdent un budget alloué à cette double tâche, mais la mobilisation des machines et des hommes reste très coûteuse et les produits ne sont pas récupérés.

1.5 De l'exploitation forestière à la valorisation des déchets

1.5.1 La filière bois française

Le bois est depuis longtemps utilisé à la fois pour ses caractéristiques esthétiques et mécaniques, pour sa disponibilité. C'est un matériau qui possède des qualités propres à un matériau vivant mais aussi une anisotropie, une hétérogénéité et une variabilité qui constituent des contraintes lors de sa transformation tout au long de la filière. On a coutume de séparer la première transformation (abattage, débardage, scieries, placages…) et la seconde (ameublement, construction, menuiserie). Une filière parallèle prend également de l'importance ces dernières années : celle du retraitement des déchets et des produits en fin de vie à base de bois. Sans vouloir tomber dans l'énumération exagérée,

on peut signaler qu'un quart du territoire national français est couvert par la forêt (16 millions d'hectares, en constante augmentation [FPF ;9] et que celle-ci constitue la moitié de la surface boisée de la CEE [ONF ;10]. Selon les chiffres du gouvernement de 2008 [GOUV ;11], la filière bois emploie 173 000 salariés et réalise 33 milliards d'euros de chiffre d'affaires dans les entreprises de 20 salariés ou plus. Un artisanat puissant la renforce avec 58 000 salariés et la partie commerciale emploie, quant à elle, 18000 personnes de plus, le tout pour 7 milliards d'euros de chiffre d'affaires. En termes d'emploi, cette filière, hors artisanat, représente autant que l'industrie automobile (259000 emplois en 2008). Cette filière, très hétérogène, regroupe des activités relevant du ministère de l'agriculture et de celui de l'industrie et présente la caractéristique d'être implantée sur l'ensemble du territoire. En effet, les exploitations forestières et les scieries côtoient les entreprises du travail du bois, du meuble, et de l'industrie papetière. Cette filière se compose ainsi d'industries de main-d'œuvre et de process. Les débouchés des secteurs situés dans la deuxième transformation de la filière se concentrent dans les activités du commerce ou de la construction. La perte de 25 000 emplois, depuis l'année 2000, est due au ralentissement de l'activité dans l'industrie papetière (- 15 000 salariés) et dans celle du meuble (- 10 000 salariés). La production de la filière est stable sur cette période grâce aux performances des industries du travail du bois dont l'activité a progressé de 10 % entre 2000 et 2006.

Tout au long de cette filière, le machinisme est présent afin d'effectuer des opérations de transformation du matériau. Ces différentes étapes de transformation façonnent le matériau bois par l'action d'outils très variés. La Figure 18 précise, dans le cadre de la première et seconde transformation du bois, quelles sont les différentes étapes de modification du matériau. L'industrie du bois même si elle est encore artisanale sous de nombreux aspects (petites entreprises, petits propriétaires forestiers…) est en train de changer de façon radicale depuis quelques années. En effet, le taux d'encadrement de la filière augmente dans tous les domaines, les procédés s'automatisent, la compétitivité grandit. Désormais, la transformation du bois n'est plus laissée au hasard et l'on conjugue de plus en plus les avancées technologiques avec les connaissances empiriques. En ce qui concerne l'usinage du bois, les matériaux à base de bois et les essences se diversifient, les matériaux et les outils de coupe sont de plus en plus élaborés et l'on maîtrise de plus en plus l'interaction entre l'outil et la matière bois, si particulière. De cette manière, l'évolution technique de l'usinage bois fait évoluer les métiers vers des « usineurs bois » ou encore des « mécaniciens du bois ».

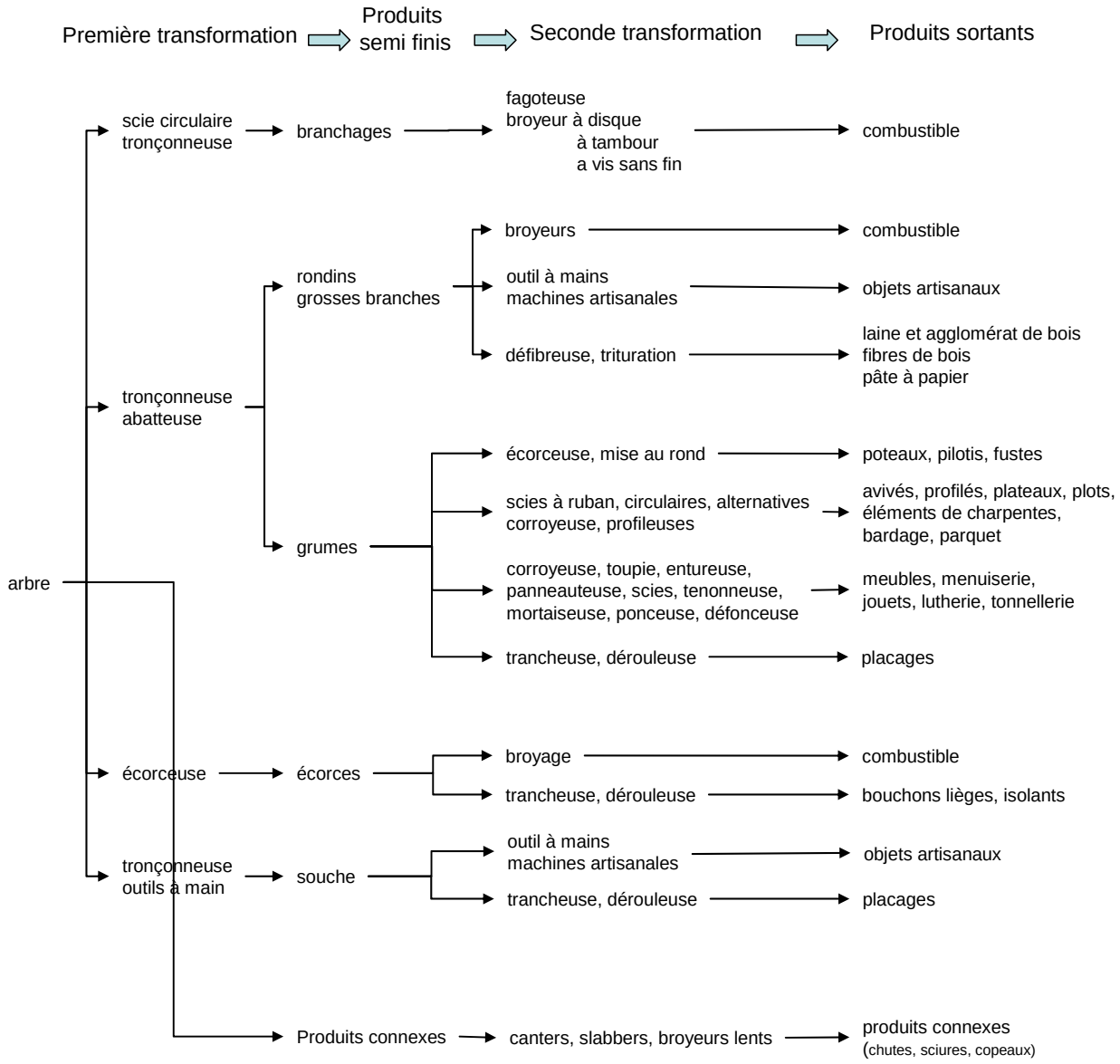


Figure 18 : Détail non exhaustif des machines et process dans la première et seconde industrie du bois, adapté de MARTIN [12]

1.5.2 Valorisation des déchets bois issus des haies

La filière de revalorisation des déchets issus de la transformation du bois depuis l'arbre jusqu'au meuble est depuis quelques années au cœur de beaucoup de discussions. Ce qui était, il y a encore quelques années considéré comme des déchets encombrants et coûteux est en train de devenir de plus en plus de la biomasse revalorisable. Cette biomasse revalorisable peut alors être réinjectée dans la filière et devenir rentable. La valorisation des déchets issus de l'élagage des haies entre dans la même filière de gestion des produits issus de la filière bois habituelle. Les déchets issus de l'entretien des haies de bords de route sont des Déchets Industriels Banals (DIB) constitués d'une partie végétale chlorophyllienne (le feuillage et les fruits) et d'une partie ligneuse issue de la croissance de l'arbre. A

ce titre, ils entrent dans la catégorie 03 01 05 du décret n°2002-540 du 18 avril 2002 du droit français [CTBA ;13].

Pour ce type de déchet, les possibilités de valorisation ne manquent pas. En effet, de nombreux ouvrages et articles traitent des voies de valorisation, des plus importantes aux plus anodines. L'Institut Technologique FCBA [13] et l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) [11] font parti de ceux qui publient le plus d'informations à ce sujet. En ce qui concerne les haies françaises, les données sont relativement succinctes car il est délicat de pouvoir correctement apprécier les volumes engendrés. Néanmoins, nous avons identifié les voies possibles de valorisation, en avons étudié le cahier des charges de la biomasse qu'elles écoulent et nous en avons retenu quelques unes. L'étude dans sa globalité se trouve en annexe I. Chacune d'entre elles peuvent présenter leurs avantages mais aussi certaines difficultés techniques ou financières. Après une étude approfondie, trois pistes ressortent :

- La fabrication de paillage,
- La fabrication d'amendement organique,
- Le bois énergie.

Toujours dans le but de proposer un « pack de valorisation de la biomasse » aux clients de l'entreprise NOREMAT, nous nous sommes penchés sur la valorisation la plus rentable et nous avons poursuivi les futures recherches en vue de concevoir un outil capable de fabriquer des plaquettes de biomasse utilisables dans la filière du bois énergie.

Cette dernière semble la plus prometteuse afin de valoriser la biomasse des déchets d'élagage, elle représente une certaine valeur ajoutée au produit et est accessible facilement. Cette filière est en pleine expansion et draine un volume de bois très conséquent.

1.5.3 Positionnement de NOREMAT auprès de la filière bois énergie

Le paragraphe suivant n'a pas la prétention de décrire de façon précise et exhaustive la filière bois énergie, mais simplement d'en tracer les grandes lignes afin de mieux l'appréhender vis-à-vis de la problématique qui nous concerne. Il convient avant tout de préciser, de façon générale, la configuration des haies sur lesquelles va agir l'outil. Il s'agit d'entretien régulier de haies (tout les 2 à 3 ans environ) sur diverses essences (en général feuillues). Les branches coupées excèdent rarement les 10 cm de diamètre et sont très ramifiées.

Filière essentielle pour les professionnels de la forêt et du bois, le bois énergie constitue un débouché à peu près équivalent en tonnage aux bois d'œuvre et d'industrie réunis, soit environ 2 milliards de tonnes par an, les plaquettes à destination du chauffage occupent près de 30% de la production globale

de sous produits bois [14]. La filière bois énergie propose plusieurs types de combustibles, toujours à base de bois, ils présentent plusieurs configurations :

- La bûche : utilisée depuis des années en foyers ouverts et de nos jours en chaudière, elle n'est cependant pas valable dans notre cas compte tenu de la taille des branches coupées. En effet, il parait difficile de produire des bûches de tailles respectables avec des branches de 2-3 ans d'âge. De plus, les bûches peuvent être vendues en longueurs variables et doivent être assez droites, ce qui n'est pas facile à obtenir avec des branches de haies.
- Le granulé : nouveau venu chez les combustibles bois, il se présente sous la forme de sciure séchée et compactée pour obtenir un élément calibré et propre. Ce produit présente une bonne valeur ajoutée, mais les transformations nécessaires à son obtention à partir de branches de haies représentent un coût trop important par rapport à la sciure provenant de scieries par exemple.
- La plaquette : issue de l'exploitation forestière ou de la filière bois, elle présente un bon compromis entre la modernité (calibration, pouvoir calorifique) et son coût de transformation (broyage et séchage). En effet, nous cherchons à obtenir des éléments de tailles moyennes (entre la bûche et la sciure)

La plupart des chiffres suivants sont tirés d'une étude effectuée par Biomasse Normandie, en 2003, qui traite du bois énergie en France [15]. Le bois énergie dispose de trois domaines d'application qui représentent une consommation finale d'énergie de 9 MTEP par an (environ 40 millions de m^3 équivalent bois rond):

- Le chauffage domestique : en France, on estime à plus de 300000 le nombre d'appareil de chauffage au bois [16].
- Le chauffage collectif qui possède deux logiques bien différentes : les chaufferies de taille moyenne (de 200 kW à 1 MW) et les plus grosses.
- Le chauffage dans l'industrie qui est en légère croissance avec 1000 installations au total. Il s'agit souvent de retraitement des propres déchets de l'entreprise.

L'objectif lors de la vente d'une nouvelle machine d'élagage NOREMAT sera de proposer au client la possibilité d'augmenter son chiffre d'affaires en commercialisant les plaquettes de chauffage produites par sa machine. Le propriétaire de la machine devient alors un vrai producteur de plaquettes de chauffage mais ne peut en aucun cas entrer en concurrence avec les gros producteurs de plaquettes forestières à cause d'un volume de production trop faible. Du fait de la petite taille des branches à entretenir, les plaquettes produites seront de petites tailles et donc en quantités relativement faibles en comparaison avec les autres filières de fabrication. C'est pour ces raisons que le marché ciblé par la production de ce type de plaquettes sera le particulier et les collectivités possédant des chaudières de

puissances inférieures à 200kW. C'est en effet en dessous de cette puissance que les chaudières utilisent des vis sans fin pour alimenter les foyers des chaudières en plaquettes. Ce type de technologie réclame de petites plaquettes calibrées pour fonctionner.

Les produits issus de l'élagage de bord de route sont encore considérés comme des déchets. Les personnes chargées d'entretenir ces haies sont déjà rémunérées pour la coupe et le broyage en plaquettes. Etant donné qu'à l'heure actuelle les plaquettes sont laissées sur place, les coûts de la matière première et de la fabrication sont considérés comme nuls. Nous sommes donc en présence d'un produit fini, calibré, de qualité moyenne pour la combustion mais très économique. Il s'agit donc de proposer aux clients NOREMAT une machine capable d'effectuer le même travail mais avec une calibration et une récupération de plaquettes.

1.5.4 Cahier des charges de NOREMAT pour la conception du nouvel outil

A la lumière de son expérience dans le domaine à laquelle viennent s'ajouter des contraintes techniques, législatives et financières, un premier cahier des charges a été élaboré.

Le nouvel outil doit être capable de :

- Couper les branches de haies de façon propre,
- Broyer ce qu'il a coupé et le transformer en plaquettes,
- Récupérer les plaquettes et les stocker,
- S'adapter aux machines actuelles de NOREMAT.

Le nouvel outil doit s'adapter aux contraintes suivantes :

- Présenter une sécurité optimum : par exemple, ne pas avoir d'outil tournant dans l'axe de la route comme le lamier,
- Respecter des contraintes d'encombrement, de poids et de consommation de puissance.
- Les plaquettes produites doivent être utilisables dans les chaudières équipées de vis sans fin.

Chapitre 2. APPROCHE DES HAIES FRANÇAISES ET DE LEUR VALORISATION EN BOIS ENERGIE

Selon Alain REY, dans le « Dictionnaire historique de la langue française », le mot « haie » vient du latin « haja » à partir du IX^{e} siècle. Dans le nord de l'Europe on retrouve de nombreux mots possédant la même racine utilisée pour désigner tantôt le « jardin », tantôt le foin etc. On rapporte même que les normands, fraîchement arrivés en Angleterre, apportèrent le mot « haya », désignant un piège pour attraper les cerfs, qui, par la suite a donné « hag », puis « hedge » l'actuel mot pour désigner la haie. L'étude des haies françaises est un préliminaire important à la compréhension des différents phénomènes entourant le futur outil de coupe. Ces phénomènes sont variés et le présent chapitre aura vocation à éclaircir les points suivants :

- Organisation et gestion du système bocager français,
- Caractérisation qualitative et quantitative des haies,
- Approche des propriétés physiques de celle-ci pour l'usinage,
- Adaptation de la biomasse des haies à la filière bois énergie.

Il est important de préciser, en ce début de chapitre, que la recherche bibliographique dans les deux premiers domaines n'a pas été chose aisée car, s'il est facile de trouver des études locales (canton, département au maximum), il n'existe que très peu d'estimation sur le territoire français dans sa globalité. Seules quelques associations, comme SOLAGRO, éditent des ouvrages traitant du bocage français dans son intégralité. SOLAGRO est une association qui effectue des bilans environnementaux de systèmes tournant autour de trois thèmes principaux : l'énergie, l'environnement et l'agriculture. A ce titre, ils ont publié des rapports sur le bocage français et ses possibilités de revalorisation. Certaines études sont menées par des institutions comme l'INRA rattachées au ministère de l'écologie et du développement durable. Pendant les années 1970, il y a eu une réelle volonté politique d'étudier les bocages ; à la suite de quoi, des colloques, des ouvrages et la loi sur la protection de la nature ont été publiés. Pourtant, ces publications restent, la plupart du temps, des estimations orientées sur des applications locales.

2.1 L'organisation de la haie et du bocage

Comme dans la plupart des pays européens, en France le maillage bocager, très lié à l'élevage de plein air a fortement diminué, depuis les années 60. Désormais, les pouvoirs publics, soucieux de préserver ce patrimoine, ont relancé des campagnes de replantation afin de remédier aux problèmes engendrés par cette « débocagisation ». La définition de bocage peut être très large et peu de littérature la définisse de manière précise : il s'agit de paysages ayant pour caractéristique la présence de réseaux de structures de végétaux ligneux. Pour les haies, c'est également délicat. Tous les auteurs s'accordent sur le fait que c'est un alignement d'arbres ou d'arbustes. Mais les critères d'appréciation d'un arbre ou d'un arbuste sont parfois différents ainsi que la définition d'un alignement. Pour notre étude, nous

avons choisi la définition produite par l'Inventaire Forestier National. Une haie arborée est, au sens de l'IFN, « tout alignement d'une largeur au plus égale à 10m, de 25m de longueur au minimum, comprenant au moins 3 arbres inventoriables (diamètre dépassant 7 cm) avec au moins 1 arbre tous les 10m » [IFN ;17].

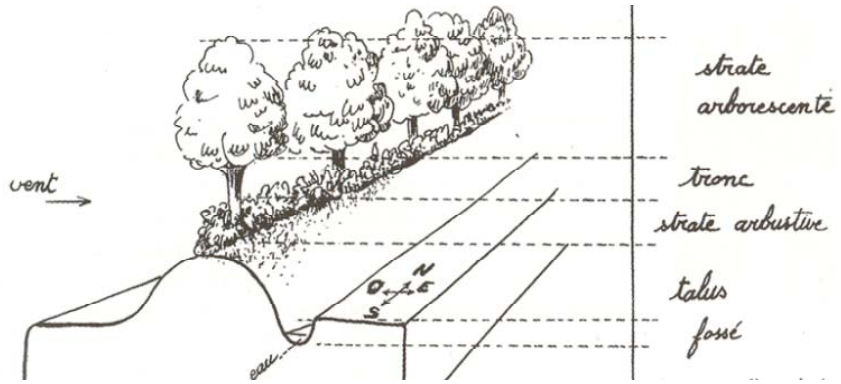


Figure 19 : Structure d'une haie sur talus avec fossé [19]

2.1.1 Diversité du bocage français

Comment arriver à décrire toute la diversité existante au sein des bocages français (et à fortiori mondial) ? C'est une vaste question que quelques auteurs ont traités comme HOUSSEL [18] et BAUDRY [19] dans leurs travaux. Les haies sont au moins aussi diverses que les régions bocagères. Cette diversité tient au nombre de strates de végétation, aux espèces mais aussi à la diversité du mode de taille des arbres et arbustes. La haie est d'abord une limite, une clôture, un bord. Les haies jouent également de nombreux rôles de protection, de ressources en matières végétales etc. et sont donc produites en ce sens. Par exemple, la haie peut avoir pour but de retenir des animaux dans un champ, elle peut être alors composée d'épineux ou d'arbustes tressés. Elle peut être source de produits et ainsi être composée d'arbres plus importants pour faire du bois d'œuvre ou de chauffage, d'arbres fruitiers ou fourragers.

Figure 20 : A gauche, haie de champs avec arbres de haut jet et à droite, haie sur talus avec essences arbustives [19]

Les conditions de pousse d'une haie représentent également une diversité importante : une haie poussant en montagne sera bien différente d'une haie de plaine. Les principaux facteurs entrants dans la diversité des haies françaises sont les suivants :

- Répartition des arbres et des arbustes sur le linéaire
- Essences présentes
- Modes d'entretien et de coupe
- Périodicité des entretiens
- Région de croissance
- Rôle de la haie…

En effet, suivant la fonction que doit avoir la haie (protection, coupe vent, production de fruits ou de bois…) sa taille et donc sa physionomie seront très différentes. Lorsqu'il possède le rôle de clôture délimitant une propriété ou un pâturage, le réseau bocage propose des formes des plus complexes. C'est pourquoi il est très difficile de pouvoir apprécier de façon précise les caractéristiques des haies françaises. De plus, il est important de souligner que ces variations importantes n'empêchent pas les machines NOREMAT de les entretenir. Les machines actuelles doivent, en effet, être capables d'entretenir de la même façon des résineux de régions montagneuses que des haies d'aubépines de plaines.

2.1.2 Aspects historiques

La diversité décrite précédemment est souvent un produit de l'histoire des haies. La phase de construction n'est pas universelle à une période donnée, la création des haies bocagères s'est, au contraire, échelonnée au cours de l'histoire, voire de la préhistoire [MEYNIER,20]. Au cours de l'histoire, le bocage a vu son rôle évolué passant de la délimitation des propriétés des tribus à des barrières de défense en temps de guerre chez les romains. Au Moyen-âge, les haies commencent à être utilisée en tant que drainant pour les eaux afin de lutter contre la sécheresse. C'est également à cette époque que l'on plante et entretient les premiers alignements. Le développement de l'élevage, à mettre en relation avec la consommation accrue de viandes dans les villes et le développement de la production laitière au cours du XIV^{e} et du XV^{e} siècle, favorise la mise en place de réelles structures bocagères. Au XVIII^{e} et XIX^{e} siècle on observe une densification des réseaux bocagers due aux importants partages des terres qui s'opèrent et globalement le mouvement de plantations se poursuit jusqu'à la seconde guerre mondiale. Les changements les plus récents sont intervenus avec l'intensification et la modernisation de l'agriculture. La mécanisation des cultures nécessitait des surfaces agricoles plus grandes. De cette manière, au XX^{e} siècle, 600 000km de haies ont été détruits entre la fin des années soixante et les années quatre-vingt soit la moitié du linéaire total. Aujourd'hui,

les conséquences liées à leur destruction font redécouvrir quelques-unes de leurs fonctions essentielles et des campagnes de replantation sont remises en place par les collectivités locales.

2.1.3 Gestion de l'entretien

La gestion de la haie de nos jours résulte d'interactions nombreuses entre plusieurs phénomènes : les uns sont « naturels » (nature du sol, exposition, relief, climat…), les autres sont humains. Ces derniers se décomposent en trois grandes catégories ; les facteurs techniques et économiques (systèmes de production, techniques agricoles…), les facteurs juridiques (statut foncier de la haie…), les facteurs sociaux.

Les modes de gestion de l'entretien de la haie sont conditionnés par l'appartenance de celle-ci : ils peuvent être privés (pour délimiter deux parcelles de particuliers par exemple) ou publiques (comme sur les bords de route). Pour les haies de particuliers, il n'existe pas de règles spécifiques en termes de gestion, chacun gérant son domaine comme bon lui semble. Pour le domaine public, nous avons assisté à la disparition progressive des cantonniers dans les villages. Le relais a été donc repris par les pouvoirs publics pour l'entretien des paysages jouxtant le domaine public. Dans ce cas, la majorité des entretiens se réalise avec les moyens humains et matériels de la commune (ou communauté de communes) ou de la Direction Départementale de l'Equipement (DDE). Généralement les entretiens des haies de bords de route s'effectuent pendant l'automne et l'hiver, en dehors de la saison de fauche des talus et pendant que les arbres ont moins de feuilles (visibilité accrue). Lorsque cette période arrive et que les fonds sont disponibles dans la commune, celle-ci fait appel à l'organisme se chargeant de l'entretien et un chantier est organisé.

Afin de mieux connaître les habitudes des personnes entretenant les haies avec des machines mécaniques, nous sommes allés visiter des chantiers d'élagage afin de recueillir un maximum d'informations. Un des premiers critères importants d'un chantier est la périodicité d'entretien de celui-ci. Un chantier annuel produira des branches de plus faibles diamètres, nécessitera un matériel moins consommateur en énergie et occasionnera une usure moins importante des outils qu'un chantier dont les coupes sont espacées de deux à cinq ans. Un chantier classique d'entretien d'une haie de 3-4 ans se déroule de la façon suivante : le matin du premier jour, deux tracteurs, deux bras et deux groupes (lamier et broyeur, machines décrites en paragraphe 1.4.3) sont amenés sur le chantier (par deux chauffeurs) et pendant les 8 heures de travail de la journée, le lamier coupe les branches qui tombent à terre, les branches sont positionnées manuellement dans le fossé et le broyeur suit en réduisant le volume des branches à terre, puis les laisse dans le talus. Pour les chantiers de plusieurs jours, les tracteurs sont entreposés tous les soirs dans une ferme voisine ou un hangar..

2.1.4 Production

Le bois de feu est la principale utilisation des haies à but productif. Consommé sous forme de bûche ou de rondins, il sert pour le chauffage des logements et surtout pour alimenter des cheminées d'agrément ou d'appoint. Selon CAIX [21], le bois de feu assure jusqu'à 22% de la consommation totale en énergie des exploitations agricoles. La consommation de bois de feu n'est pas réservée aux régions forestières et l'on note également une forte utilisation dans les coins bocagers. La valeur économique des haies est également constituée par la présence des arbres de haut jet qui produisent le bois d'œuvre. Les principales essences conduites en arbres de haut jet sont le châtaignier, le chêne, le frêne. Il est important de ne pas confondre la production de billons issus des troncs des arbres et ceux provenant des branches. Dans le cas de l'élagage de bords de route, il est clair qu'il s'agit de branches possédant des dimensions et des volumes moindres.

La production de fruits est un apport supplémentaire qui peut être attendu. Si les anciennes haies ne produisent plus guère, les nouvelles plantations peuvent assurer une diversité et une production intéressante. La gamme s'élargie lorsqu'on voyage vers le sud de la France : fruits secs (noix, noisettes, châtaignes…), des fruits à noyaux (abricots, cerises, prunes…), des fruits à baies, à pépins (nèfles, pommes, poires, arbouses…):

Avec certaines tiges droites, il n'est pas rare de voir des agriculteurs produire des piquets pour le clôturage des terres agricoles. D'une façon générale, et après interrogation d'agriculteurs, les haies sont actuellement perçues comme un bon moyen de séparer les propriétés et de réguler les conditions de celles-ci : réduction du vent, tenue des terrains… Malheureusement, ceux-ci y voient également une charge d'entretien importante qui ne leur rapporte rien. La solution de l'entreprise NOREMAT est d'apporter une nouvelle machine assurant une nouvelle rentabilité.

2.2 Méthodes d'estimation quantitatives des haies françaises

Nous l'avons vu précédemment, la bibliographie sur le domaine des haies est assez pauvre. Il en va de même pour le domaine de la caractérisation de celles-ci. J.BAUDRY de l'INRA de Rennes (56) est l'un des seuls à avoir proposé une méthode moderne d'estimation du linéaire de haie sur une parcelle donnée. En effet, jusqu'à présent, les haies étaient comptabilisées et inventoriées par des relevés sur terrains, long et fastidieux tel que peut le faire l'Inventaire Forestier National. Le présent paragraphe traite de ces différentes méthodes et de celle que nous avons mise en place pour notre étude. L'objectif est d'obtenir un chiffrage afin de préparer une étude de marché pour notre outil.

2.2.1 Méthode d'analyse cartographie de J.BAUDRY

J.BAUDRY a proposé une méthode basée sur des moyens modernes d'imageries numériques. Il a récolté une importante base de données auprès de l'Institut Géographique National (IGN). Cette base

de données est constituée d'une superposition de données cartographiques et de photos aériennes. Pour chaque zone concernée, il est donc possible d'obtenir une photographie métrée des alignements présents. Nous avons testé cette méthode en l'appliquant à un village proche d'Epinal (88).

Figure 21 : A gauche, cartographie d'Uriménil (88) et à droite, équivalent photographique (IGN)

Grâce à cette base de données couplée à une observation sur le terrain, il est possible de délimiter de façon précise le réseau bocager (Figure 22). Nous recadrons dans la photo numérique la zone qui nous intéresse et notons avec un logiciel informatique de CAO/DAO, les lignes de réseaux bocagers.

Figure 22 : Même zone que précédemment mais en repérant les alignements

De cette façon, nous obtenons la position géographique des nœuds du réseau bocager, le relevé sur site permet de caractériser les haies en prenant plusieurs critères.

Code	Variable
HMAX	Hauteur maximale (du plus grand arbre de la haie)
HDOM	Hauteur dominante de la haie (hauteur des arbres ou arbustes) la plus fréquente
LCA	Largeur de la canopée (entre les branches extérieures)
LIC	Largeur de l'inter-champ (entre les bords labourés ou pâturés des champs adjacents)
LTF	Largeur talus-fossé (entre le bord extérieur des fossés ou du talus)
HT	Hauteur du talus (de chaque côté)
PF	Profondeur du (ou des) fossé(s)
LF	Largeur du (ou des) fossé(s)
RCO	Recouvrement de la strate arborescente (hauteur > 4 m), en %
RCU	Recouvrement de la strate arbustive (1 m > hauteur < 4 m) en %
RCU	Recouvrement de la strate herbacée (hauteur < 1 m) en %
PER	Perméabilité de la haie à l'air en %
NTO	Nombre de trouées

Figure 23 : Liste des critères utilisés par J.BAUDRY pour la caractérisation des haies sur site

Grâce à cette méthode, nous obtenons des résultats très précis, avec un linéaire, un inventaire d'essence, la répartition géographique, mais uniquement sur une surface réduite : 2000km^2 soit 1/275^e de la surface du territoire français. Cette méthode présente une réelle avancée dans les inventaires des haies françaises, elle allie des méthodes modernes, rapides et efficaces, à des méthodes plus traditionnelles incontournables. Néanmoins, tout comme la plupart des méthodes, elle reste réservée à un espace réduit et ne peut en aucun cas nous renseigner sur le territoire métropolitain français dans son intégralité. BAUDRY précise néanmoins qu'il pourrait être possible d'utiliser cette technique avec d'autres données satellitaires afin d'atteindre l'échelle de la région.

2.2.2 Inventaire Forestier National

L'Inventaire Forestier National (IFN) a été créé en 1958 pour mieux connaître les potentialités des forêts françaises. Il est chargé de l'inventaire permanent des ressources forestières nationales. L'IFN est devenu établissement public à caractère administratif sous tutelle du ministre chargé des forêts en 1994. Les données sont recueillies à partir de photographies aériennes ainsi que d'observations et de mesures sur le terrain. Ces informations dendrométriques, écologiques et floristiques sont enregistrées dans des bases de données et mises à la disposition du public. Cet inventaire constitue la plus grosse base de données sur le bocage français en consultation libre.

En ce qui concerne les alignements, les informations de l'IFN comprennent une estimation du linéaire des haies et des alignements, une estimation du volume de bois des arbres hors forêt, du nombre des arbres et, parfois, de l'accroissement biologique annuel ainsi qu'une liste des principales essences présentes. Il convient de préciser que l'IFN a pour mission première d'évaluer la ressource forestière,

et les arbres hors forêt ne sont pas une priorité [IFN ;22], c'est pourquoi la présence de tous ces renseignements n'est pas systématique dans chacun des départements.

Pour le linéaire, l'IFN distingue 4 types d'alignements (au sens général du terme) qui sont additionnés pour notre étude :

- La haie arborée : présentant des arbres forestiers sur au moins 1/3 de sa longueur,
- La haie non arborée : avec des arbres forestiers sur moins de 1/3 de sa longueur,
- Les alignements de peupliers,
- Les autres alignements.

Après avoir précisé les choses avec la direction de l'IFN, les haies n'ont pas été recensées sur les autoroutes, les routes nationales et sur environ la moitié des routes départementales. D'après les chiffres du gouvernement, les linéaires de ces voies de transports sont les suivants [GOUV ;23]:

- Autoroutes : 12094 km (concédées ou non),
- Routes nationales : 27000 km (dont une partie a été rétrocédée aux départements),
- Routes départementales : 362033 km.
- Soit un total de routes non recensées de 220110 km.

2.2.3 Elaboration d'une méthode d'estimation du linéaire français à partir des données de l'IFN

Afin de créer une base de données utile pour l'étude de marché du futur outil de coupe, nous avons traité les données disponibles auprès de l'IFN pour chacun des départements disponibles et nous les avons combinées. Parmi les résultats obtenus, on distingue les départements possédant un résultat d'inventaire, ceux possédant le linéaire de haies présent dans le département et ceux nous renseignant, en plus, sur la composition en essences de celles-ci. Nous avons donc fait la carte de France ci-dessous qui représente le type de renseignement obtenu pour chacun des départements métropolitains :

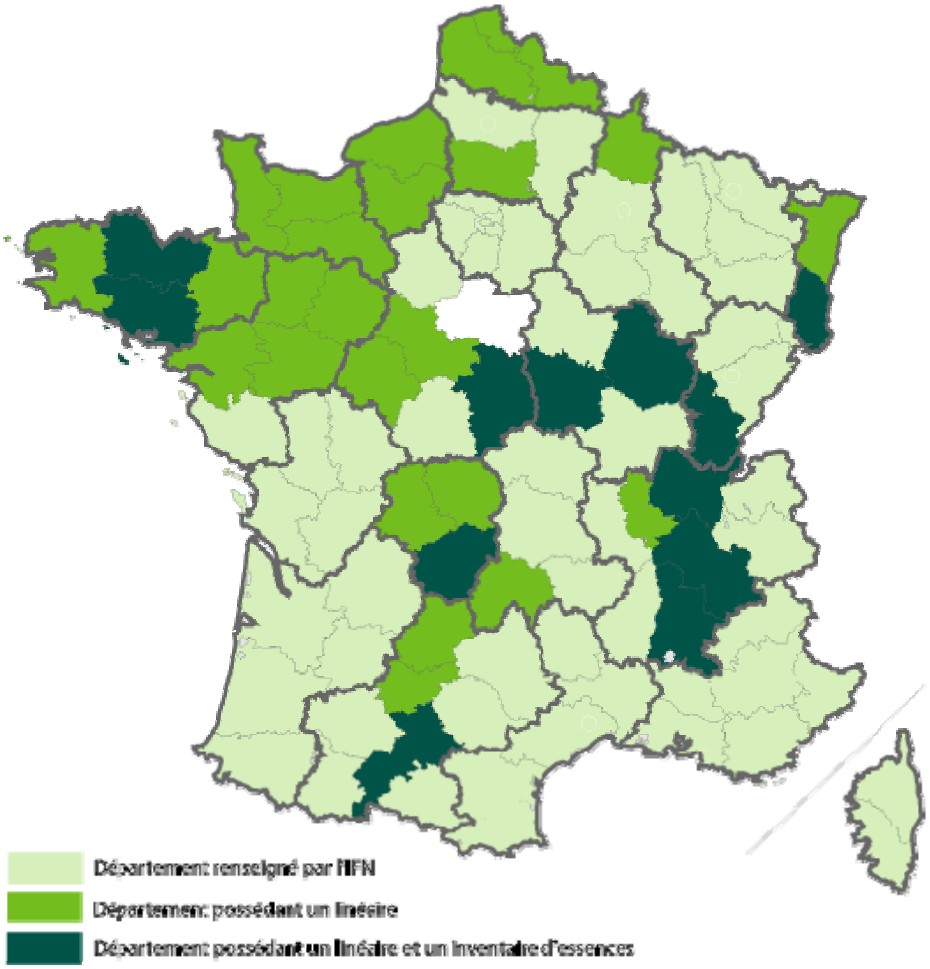

Département renseigné par l'IFN
Département possédant un linéaire
Département possédant un linéaire et un inventaire d'essences

Figure 24 : Résumé sous forme de carte des données récoltées avec l'IFN

Si nous devions la résumer en quelques chiffres :

- Nombre de départements renseignés : 94 sur 95 départements de métropole,
- La Corse est réunie en un seul fichier,
- Le 75, 78, 91, 92, 93, 94, 95 sont réunis en un seul fichier,
- Il manque le Loiret (45) dont le fichier n'est pas disponible,
- Sur les 94 départements français renseignés, seul 37 possèdent des renseignements sur les haies,
- Sur les 37 précédents, 31 nous renseignent sur le linéaire en kilomètres (82%) et 12 sur les essences présentes dans celle-ci.

Les régions les plus renseignées sont la Bretagne, la Normandie et les Pays de la Loire. C'est une tendance observée régulièrement, ces régions ont une vraie « culture de la haie ». Cela se corrèle parfaitement avec l'ensemble des études effectuées sur le bocage qui proviennent essentiellement de ces régions.

Après addition des linéaires de haies, nous obtenons 450 000 km pour les 31 départements. Comme le montre la Figure 24, les données obtenues par l'IFN, même si elles ne concernent que quelques départements, se répartissent sur la France entière. Afin d'obtenir une estimation sur l'intégralité du territoire nous effectuons donc une simple règle de proportionnalité

$$Linéaire\_français\_IFN = \frac{450000 * 95}{31} = 1380000\ km$$

Les haies recensées par l'IFN doivent être ajoutées au linéaire des routes non recensées qui contiennent la plupart du temps deux alignements :

$$Linéaire\_français\_total = 1380000 + 2 * 220110 = 1820220 km$$

Le chiffre que nous obtenons nous permet uniquement de dire la chose suivante : en France, en 2007, on peut compter plus de 1 800 000 km de haies à entretenir de manière régulière. Ce linéaire servira de base au calcul du volume valorisable. Ce chiffre, même si il n'est pas vérifiable en tant que tel, a été validé par l'entreprise NOREMAT au regard de son expérience.

2.2.4 Méthode de détermination de l'importance des haies dans les départements français

Les haies sont parfois comptabilisées sous forme de surface (en ha) qui peut alors être comparée à la SAU (Surface Agricole Utile) d'un département. Cette opération nous a permis de repérer les départements qui avaient une forte proportion de haies. L'IFN nous a permis d'effectuer ces statistiques pour les départements possédant des données sur les haies (cf. Figure 25). Les SAU nous ont été fournies par AGRESTE (agence de statistiques agricoles du gouvernement) [GOUV ;24]. Les SAU des départements qui n'étaient pas renseignés, ont du être extrapolées de proches en proches : on regarde les chiffres des départements voisins que l'on ponctue avec leur SAU, puis nous effectuons la moyenne pondérée. Finalement, cela nous permet de compléter les données manquantes et d'éditer la carte suivante (Figure 25). Cette méthode peut être utilisée par l'entreprise NOREMAT pour apporter des informations sur l'importance du réseau bocager et son influence sur la vente de machines d'entretien et sur les pièces de rechange.

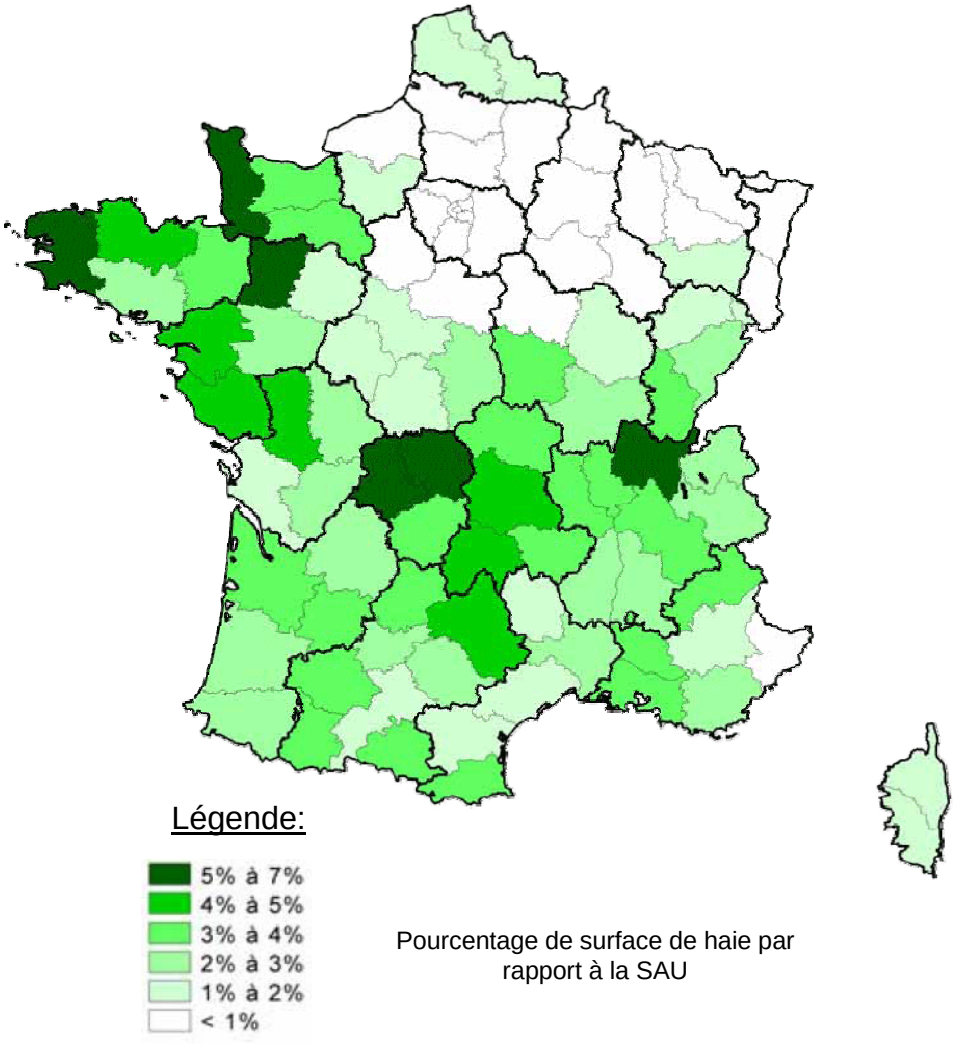


Figure 25 : Carte représentant le pourcentage de surface bocagère par rapport à la surface agricole utile.

La carte précédente nous montre les départements présentant un potentiel d'entretien de haie important et ceux qui possèdent moins de bocages à entretenir. Nous nous apercevons d'ors et déjà de la disparité qu'il peut exister entre les départements français. La différence du « taux de haies » entre deux départements peut atteindre un coefficient 7. On retrouve toujours une dominance des régions du nord-ouest, centre et centre est de la France.

2.2.5 Volume de biomasse valorisable.

Selon Philippe POINTEREAU de l'association SOLAGRO [POINTEREAU ;25], les haies françaises poussent en moyenne de 4 m^3/ km/an. Ce qui signifie qu'une haie de un kilomètre, entretenue chaque année, produira 4 m^3 de bois brut (soit 8 m^3 apparents de plaquettes (MAP) en plaquettes broyées). Ce chiffre se vérifie également chez d'autres auteurs comme BAUDRY [19] et CINOTTI [26]. Ce chiffre ne représente bien sur qu'une moyenne et n'est sûrement pas valable pour la plupart des haies mais permet d'obtenir une estimation. Ces 8 MAP équivalent à 704 m^3 de gaz naturel et 800L (0.68 TEP)

de fioul domestique (8000 kWh). Ces équivalences énergétiques nous sont données par CHANNIWALA et al. [27].

En se basant sur ce chiffre, le volume de biomasse valorisable s'élève à 7.2 millions de m^3 par an soit environ 0.65 MTEP (Millions de Tonne Equivalent Pétrole). A titre de comparaison, la France consomme environ 10 MTEP de bois par an en bois énergie [DGEMP ;28], le gisement des haies représenterait alors 6.5%. Certes, les chiffres que nous obtenons ne seront jamais de cette ampleur dans la réalité mais cela nous montre le potentiel énergétique du bocage français dans son intégralité jusqu'alors peu ou pas valorisé.

2.3 Caractérisation qualitative des haies françaises

Nous avons obtenu une estimation du linéaire du réseau bocager français. Nous allons chercher à obtenir plus de précisions sur le volume réel que cela représente et sur les essences présentes. Nous avons pris pour exemple les recherches de J.BAUDRY qui a proposé une méthode de cubage rapide, puis nous tirerons nos propres conclusions en relation avec notre étude.

2.3.1 Méthode de J.BAUDRY

BAUDRY et BUREL [29] ont proposé une méthode d'évaluation de la biomasse des haies de cépées (type de haie) dans le bocage normand sur la commune de Marchésieux (Manche). Sur le plan des essences, ils ont recensé les différentes essences présentes dans le bocage et voici les plus importantes :

- l'épine noire (*Prunus spinosa*),
- l'aubépine (Crataegus monogyna),
- le noisetier (*Corylus avellana*),
- le saule (Salix atrocina),
- le frêne (Fraxinus excelsior).

Ce recensement est certes efficace mais possède le gros défaut de ne pas être révélateur du bocage français en entier. La diversité des espèces ligneuses étant trop importante et variable. Dans l'échantillonnage de l'étude, les haies présentent des structures de végétation très diversifiées : le taux de recouvrement des arbres et des arbustes est variable, les espèces sont souvent mélangées. De ce fait, l'estimation de production de biomasse par essence n'est pas envisageable (compétition inter espèces).

Afin d'approcher un calcul de volume présent sur pied, les auteurs ont décidé de ne mesurer que les diamètres de base des ramifications. En parallèle, ils ont proposé un modèle de calcul donnant le poids de biomasse sèche en fonction de la circonférence mesurée. L'équation qu'ils obtiennent est une parabole de la forme suivante :

$$PS = aC^2 + b$$

Figure 26 : Formule donnant la masse sèche de biomasse en fonction de la circonférence du brin

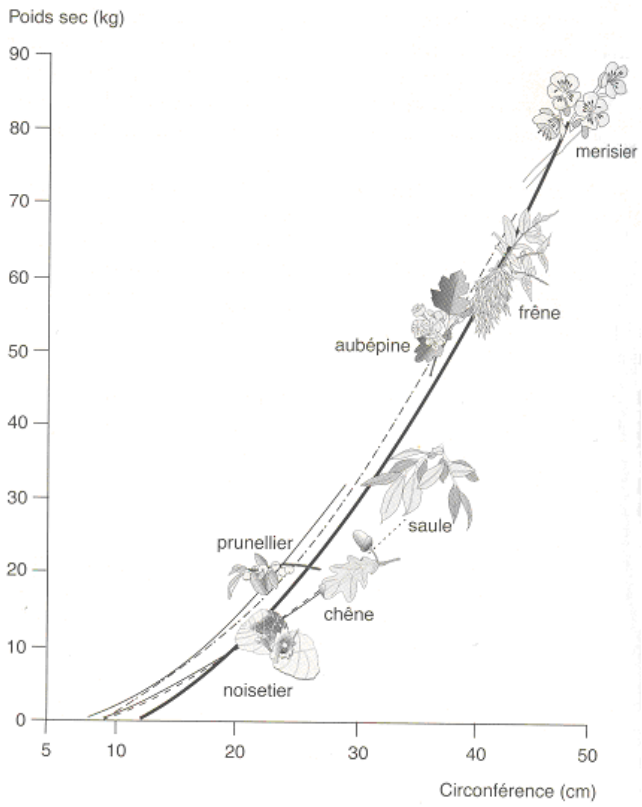


Figure 27 : Courbes de régression donnant la masse sèche du brin en fonction de sa circonférence de base [19]

Le principe de cette méthode est de noter l'essence dont on souhaite connaître le cubage de biomasse, de mesurer la circonférence des brins présents (avec un mètre souple par exemple). On obtient ainsi le volume réel de bois présent ainsi que le poids du brin. La formule de J.BAUDRY permet de s'affranchir de la troisième dimension qui est la hauteur du brin : par une mesure en deux dimensions (circonférence), nous obtenons une donnée en trois dimensions (volume).

Partant de ce constat, nous avons voulu comprendre ce phénomène et nous avons pu observer que la hauteur d'un brin coupé était dépendante de son diamètre à l'endroit où il est coupé. Nous avons effectué des mesures sur des branches de saule (53 au total) et nous arrivons à l'équation suivante : $Longueur = 100 * Diamètre$.

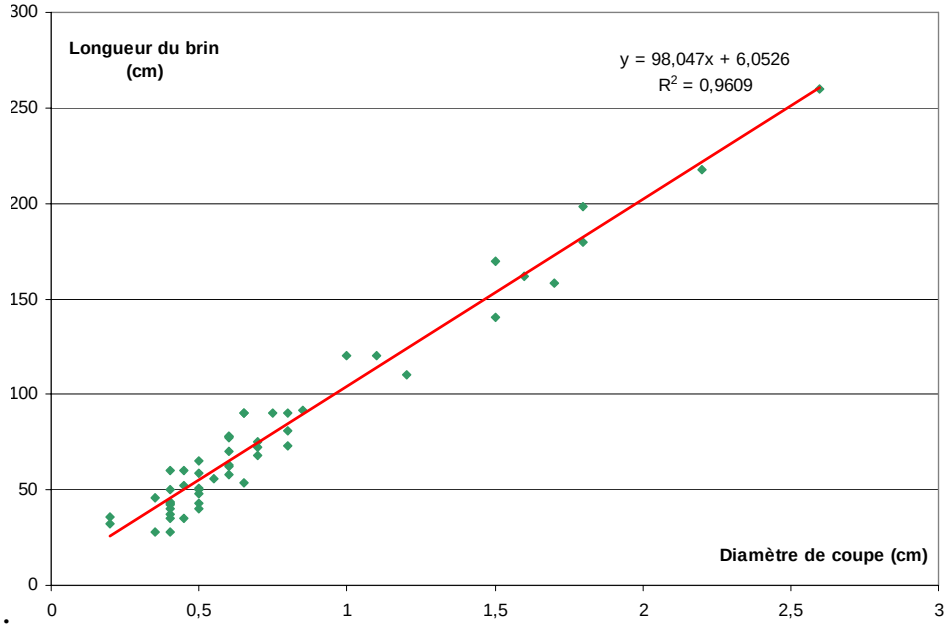


Figure 28 : Longueur du brin coupé en fonction du diamètre de coupe, courbe de régression linéaire

Après avoir pris connaissance de la méthode de J.BAUDRY, il nous apparaît que l'évaluation des haies françaises n'est pas chose aisée. La méthode permet d'aller au plus loin dans la caractérisation d'un brin en particulier, à la rigueur d'un arbre seul, mais le passage à un bocage au complet est très délicat, voire impossible. Cette méthode ne peut donc s'appliquer qu'à des bocages particuliers mais a permis d'avancer dans le domaine de la caractérisation des haies. Pour notre étude, nous devons raisonner de façon plus globale.

2.3.2 Inventaire d'essences

Afin de mieux connaître le matériau que nous allons couper, nous cherchons à savoir quelles sont les essences prépondérantes dans le bocage français. L'IFN fait partie des seuls à avoir pu nous renseigner, mais, la plupart du temps, les résultats sont difficilement exploitables. En effet, l'inventaire nous donne, lorsque cela est possible, le nombre de fois où l'essence apparaît et le nombre d'arbres ou la surface n'apparaissent pas (Figure 29).

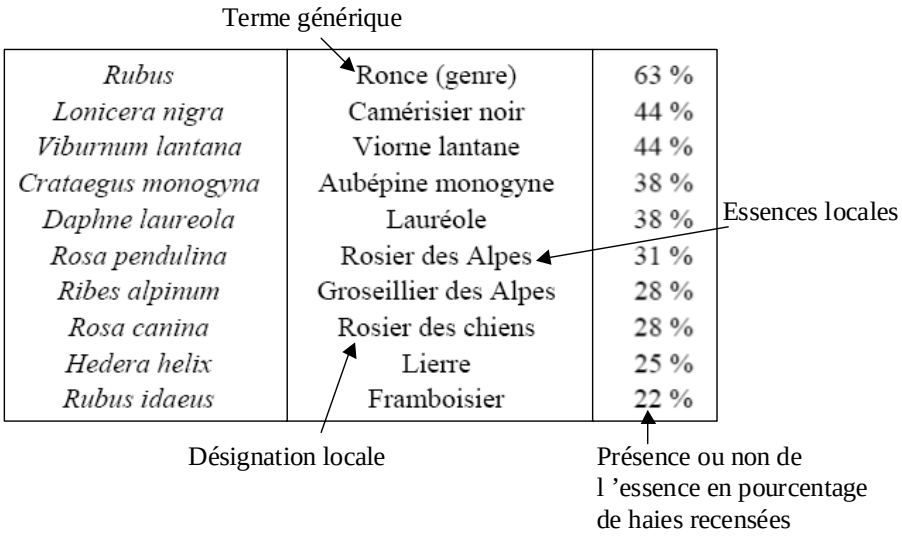


Figure 29 : Type de données fournies par l'IFN en Isère (38) [IFN ; 30]

Ces essences sont en fait « semi arborées » et ne sont pas exploitables à l'échelle du pays. De plus, certaines essences ont des désignations trop génériques ou encore trop locales comme le « Rosier des chiens » qui est en fait un Eglantier. Certains départements sont quand même mieux renseignés comme le Haut-Rhin (68) : observation de 3,4 arbres par haie en moyenne, 36 espèces d'arbres et 24 espèces de ligneux non arborescents différentes au total (Figure 30).

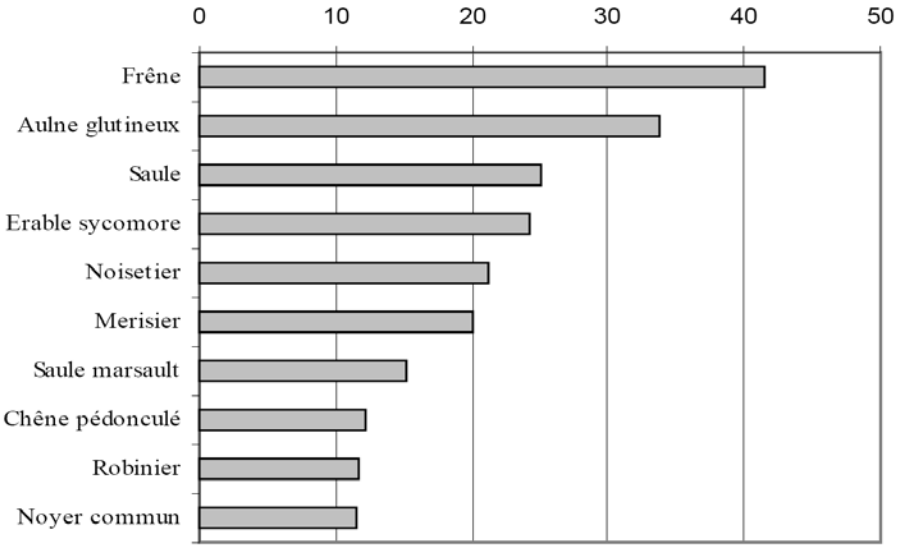


Figure 30: Fréquence des espèces arborescentes dans les haies du Haut-Rhin (en % de la longueur totale de haies) [IFN; 31]

Pour obtenir des statistiques concrètes à l'échelle nationale, nous avons développé une méthode de nouveau basée sur les données de l'IFN: après avoir effectué la somme des données, nous avons regardé le nombre d'apparition de chacune des essences existantes au niveau des haies. Nous sommes en mesure de montrer quelles sont les essences qui ressortent le plus souvent (Figure 31).

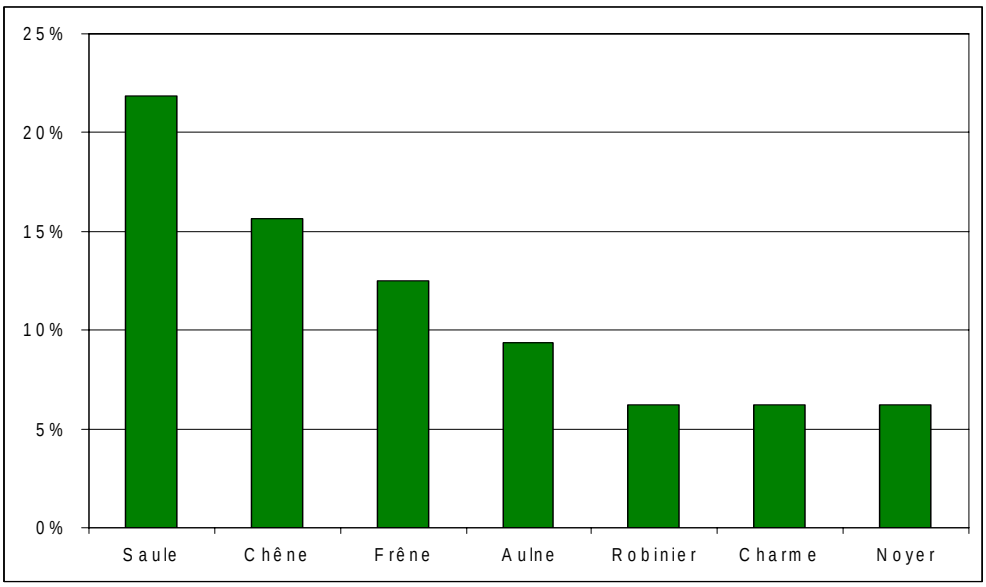


Figure 31 : Répartition des apparitions des essences de haie dans l'IFN

Les essences qui ressortent le plus souvent dans le peu de données que l'on possède sont le Saule (Salix L.), le Chêne (Quercus L.) et le Frêne (Fraxinus L.). Ce sont donc les essences que nous retrouverons dans les futurs essais.

2.3.3 Croissance annuelle des haies

Toujours à cause de la diversité des haies françaises, il est difficile de connaître précisément les rythmes de croissances de celles-ci. Si nous nous référons aux travaux de CABANETTES et al. [32] effectués sur le châtaignier (Castanea Sativa), les données suivantes sont évoquées : au cours de la première année suivant la coupe d'un tronc, la croissance des rejets du châtaignier est en moyenne de 70 cm de long pour un diamètre de 10mm. L'auteur a également étudié l'influence des outils d'élagage sur la croissance des rejets : l'utilisation de la tronçonneuse pour l'entretien réduit le nombre et la croissance (en diamètre et en longueur) des rejets au bout d'un an, comparaison effectuée par rapport à la hache. Ces résultats sont applicables à notre étude sur plusieurs points : les rejets sur souche ont un comportement de croissance similaire à ceux des rejets sur branches. De plus, le châtaignier est une essence possédant de nombreux points communs avec deux essences présentes de manière importante dans le bocage français : le Chêne et le Frêne (cf. Figure 31).

Si nous devions synthétiser le travail effectué sur le qualitatif des haies françaises plusieurs idées reviennent : la littérature est très vague sur le sujet pour une raison simple, c'est que la méthode globale n'existe pas. C'est pourquoi, nous avons dû en appliquer une nouvelle, propre à notre recherche. Cette méthode, inspirée d'autres et aidée par l'IFN, nous a permis de mieux connaître le bocage français en terme de linéaire, répartition, volume valorisable, essences et croissance.

2.3.4 Situation juridique des haies et de ses déchets

Le statut foncier de la haie est aujourd'hui un facteur essentiel de différenciation des modes de gestion du bocage. Il convient de différencier les haies bordant les espaces privés des espaces publics. Il n'existe pas de modes de gestion particuliers pour les haies jouxtant les espaces privés. Par contre, pour le domaine public les choses ont évolué. Par le passé, les haies bordant les chemins et les routes étaient entretenues par les cantonniers. Aujourd'hui, les cantonniers ont pratiquement disparu de la scène sociale villageoise. De plus, les exploitants, étant de moins en moins nombreux, confient souvent les travaux d'entretien aux pouvoirs publics. Dans ce cas là, ce sont les services techniques des communes ou des communautés de commune ou encore la Direction Départementale de l'Equipement (DDE) qui assurent le relais. Ce changement de type d'entretien a entraîné un changement dans les moyens utilisés pour le faire. Auparavant, les cantonniers et les privés utilisaient des outils à mains, type tronçonneuse, alors que les services de la DDE préfèrent des machines type groupe de débroussaillage ou lamier (machines fabriquées par NOREMAT). D'une façon générale, pour le domaine public, toute autorité en charge de la gestion d'un réseau routier doit assurer à son niveau un entretien régulier de la voie placée sous sa responsabilité juridique et son soutien financier. « Cette contrainte trouve sa source dans l'exercice de la police de la sûreté publique et dans l'obligation qui est faite d'appliquer une partie de leurs ressources budgétaires à l'entretien des routes » (conseil d'état, le 2 janvier 1983). En ce qui concerne les déchets générés par cet entretien, la loi du 15 juillet 1975 (Art. L.541-1 du code de l'environnement ;33), nous indique « qu'est déchet, au sens de la loi, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Dans le cas de l'élagage de bord de route, nous sommes en présence de deux types de déchets : les déchets bois (élagages et coupes de matières ligneuses) et les déchets verts (tontes et tailles de feuillages). Les textes classent le déchet bois issus de l'élagage comme « déchets de bois non adjuvantés » (code déchet : 02 01 05) (Figure 32) et le déchet vert comme « déchets verts encombrants » (code déchet : 19-12-07). Ils sont tous les deux de la classe des DIB : Déchets Industriels Banals.

Figure 32 : à gauche Déchets ligneux code : 02-01-05 et à droite Déchets verts code : 19-12-07

Toujours selon le code de l'environnement (art. L. 541-2 ;34), « …toute personne qui produit ou détient des déchets,…, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination… ». En d'autres termes, les collectivités locales assurant l'entretien des accotements routiers sont obligées d'éliminer, d'une manière ou d'une autre, les déchets issus de cet entretien.

Dans la pratique, la loi n'est pas appliquée de façon rigoureuse dans le sens ou le propriétaire de la haie, via l'entrepreneur chargé de l'élagage, laisse les déchets produits sur le bord de la route. La machine à concevoir qui permettrait de récupérer une partie des produits de coupe, serait par la même occasion l'opportunité de respecter la législation.

2.4 Caractérisation physique des haies françaises

Ne perdons pas de vue l'objectif de la recherche : nous devons couper les branches des haies de bords de route afin de les transformer en plaquettes de chauffage et ainsi respecter la législation qui veut que les routes soient correctement entretenues et les déchets soient éliminés. La branche à couper, nous l'avons vu précédemment, peut appartenir à des haies de formes et d'essences diverses et variées ce qui en fait un matériau à couper des plus particuliers. Le présent chapitre tente d'éclaircir certaines caractéristiques physiques de ces branches en vue de leur coupe.

2.4.1 Caractéristiques physiques - Flexion

Les branches de haies que nous devons couper ne sont pas assimilables à une pièce de bois classique dans l'usinage traditionnel. Dans l'usinage traditionnel du bois, nous avons deux configurations possibles : soit l'outil est fixe et c'est le matériau bois qui vient à sa rencontre pour se faire usiner (ex : corroyage), soit c'est le contraire (ex : défonçage). Mais dans les deux cas, la partie du couple {Outil-matière} qui est fixe, est réellement maintenue sans mouvement : bon maintien de la pièce de bois par l'opérateur ou bonne tenue de la broche de l'outil de défonçage. Dans le cas de l'élagage de bord de route, si l'on reprend l'exemple du lamier, le principe peut se schématiser ainsi selon la Figure 33.

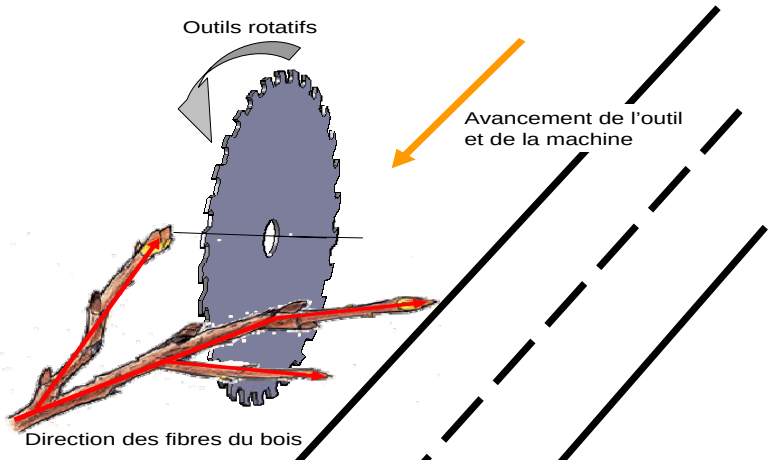
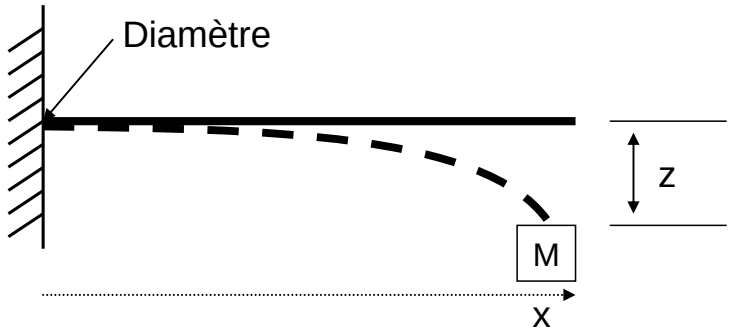


Figure 33 : Schématisation des conditions de coupe par lamier

Dans cette configuration, la branche n'est pas maintenue à proximité de l'outil. Lorsqu'elle rencontre l'outil, celui-ci exerce une force et la branche se plie. Nous sommes donc en présence d'un outil et d'un matériau à couper en mouvement continue simultané. Il est impératif pour que la coupe puisse être maîtrisée, de connaître le mouvement de la branche face à l'outil (le mouvement de celui-ci étant théoriquement mieux maîtrisé). Nous avons donc effectué des essais de flexion sur des branches très souples : les branches de Saule. Les branches de Saule étant les plus souples des trois essences vues précédemment, il s'agit là du cas le plus défavorable pour la coupe. Il s'agit, bien entendu, d'une étude de portée indicative afin d'apprécier de façon rapide la flexibilité d'éléments souples lors de la coupe.

Une branche d'arbre fixée à un tronc, soit une branche en instance de coupe, peut être assimilée à une poutre encastrée. Nous appliquons une masse constante à différents endroits de la branche afin d'en apprécier la flèche (appelée z) (Figure 34). Les tests ont été effectués sur des branches d'un même Saule, de différents diamètres, de différentes longueurs, à l'humidité d'une branche fraîchement coupée (75% sur sec).



$$z = \frac{8 * g * M * x^3}{3 * E * D^2}$$

Figure 34 : Schéma de principe des essais de flexion et formules consacrées

g est l'accélération due à la gravité (g=9.81 $m.s^{-2}$) et E est le module de Young du bois considéré (MPa). Les facteurs influençant « z » sont les suivants :

- La masse M, (fixée au début des essais), 500gr,
- La position « x » de la masse M sur la branche (ce que nous faisons varier),
- Le diamètre initial D de la branche.

Nous faisons abstraction des éventuels nœuds, fil tors de la branche et considérons que la liaison encastrement est parfaite. L'ensemble des résultats porte sur les mesures de 9 branches de diamètres initiaux différents. Ceci est illustré par le graphique suivant (Figure 35) :

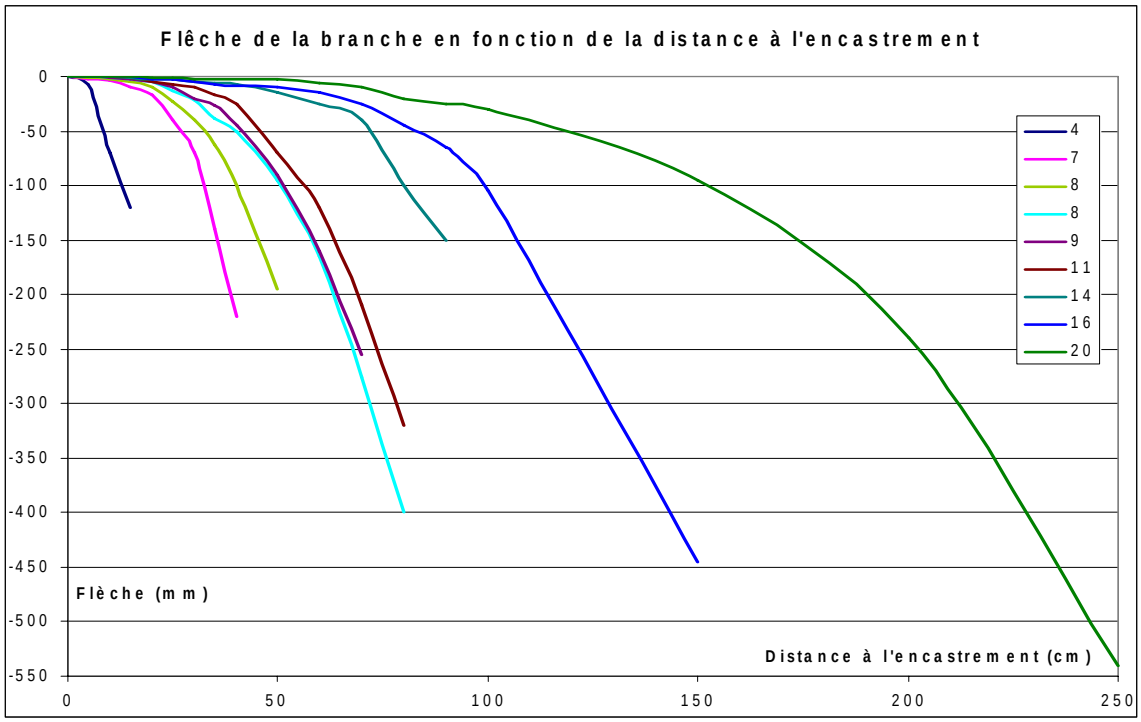


Figure 35 : Résumé des données de flexion obtenues en fonction des différents diamètres

On note que les courbes possèdent toutes sensiblement la même allure: la flèche n'est pas proportionnelle à la distance x, chaque branche résiste d'abord jusqu'à un certain point puis fléchit rapidement (Figure 36).

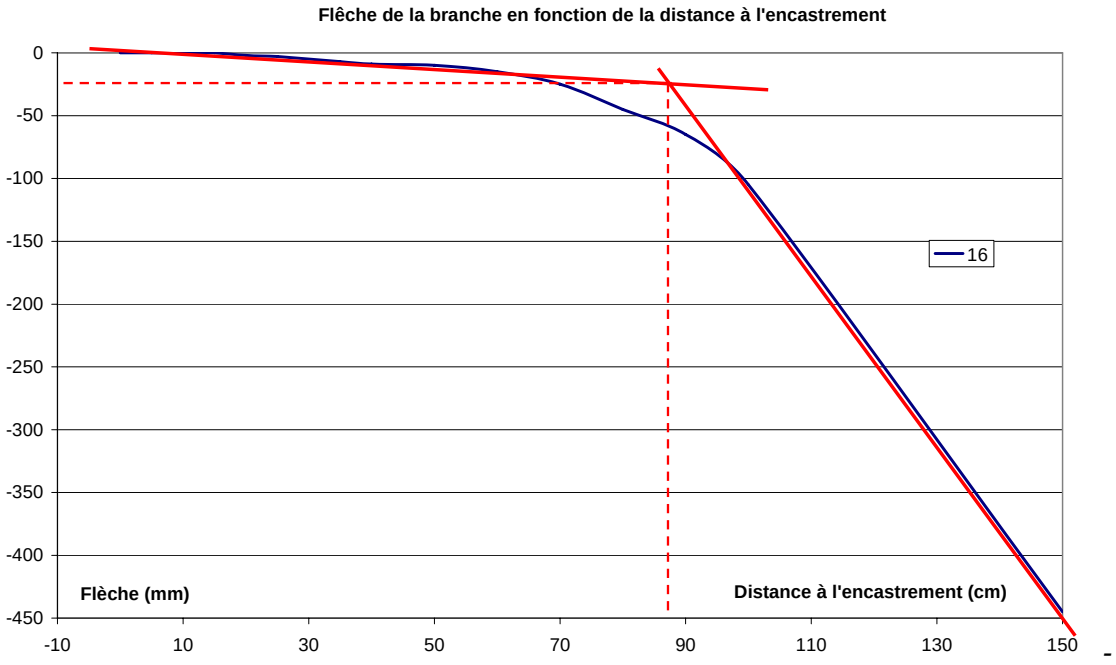


Figure 36 : Forme générale de chaque courbe et obtention du point de flexion

La courbe précédente nous montre effectivement qu'il existe un point qui correspond au point le plus loin de l'arbre (loin de la fixation de la branche sur le tronc) et présentant une résistance à la flexion encore important. Après analyse des résultats, nous nous sommes aperçus que cette distance du tronc n'étant évidement pas commune avec les autres branches, il n'en était pas de même pour le diamètre. En effet, si nous trouvons le point de chaque branche et que nous mesurons le diamètre de la branche à ce point, nous nous apercevons qu'il tourne autour de 7mm pour toutes les branches. Cette observation même si elle parait intéressante, ne nous convient pas car il est impossible de couper chaque branche d'une haie à l'endroit où son diamètre est aux alentour des 7mm. Outre l'aspect technique, l'esthétique de la haie ne serait plus acceptable.

Ces essais de flexion n'apportent que peu d'informations quant à la caractérisation des branches en flexion et donc de leur comportement face à l'outil de coupe. Nous nous apercevons néanmoins que la flexion d'une branche est un facteur à prendre au sérieux et que le comportement des branches face à l'outil sera déterminant sur la formation des plaquettes et sur l'état de surface de la haie. Dans ce genre de cas, deux solutions peuvent exister : soit la branche est prise et maintenue pendant la coupe, ce qui implique une coupe lente et non continue (ex : sécateur), soit la branche n'est pas maintenue mais est rapidement coupée (ex : lamier).

2.4.2 Caractéristiques physiques - Mesures sur chantier

Toujours dans le cadre des recherches pour caractériser les haies françaises, nous avons développé une méthode de mesures rapides basée sur l'imagerie numérique. Cette étude a fait l'objet d'un projet d'élèves ingénieurs à l'ENSTIB [35]. Le principe de cette méthode de mesure est de prendre une photo de la haie alors qu'elle vient d'être taillée. De ce fait, les sections de coupe sont repérables sur la photo numérique. Considérées comme des taches, ces sections de coupe sont numérotées, repérées dans l'espace et l'on calcule les surfaces de coupe. Ces données sont alors exploitées statistiquement. Nous pouvons ainsi récupérer les données géométriques d'une haie afin d'en sortir un travail statistique : diamètres des branches, densité de branchage, répartition…Le principe est de prendre une série de photos de l'échantillon de haie et de la traiter informatiquement pour en ressortir les sections de coupe et leurs coordonnées. Les photos sont prises suivant un protocole bien établi et chaque cote de la haie est correctement prise.

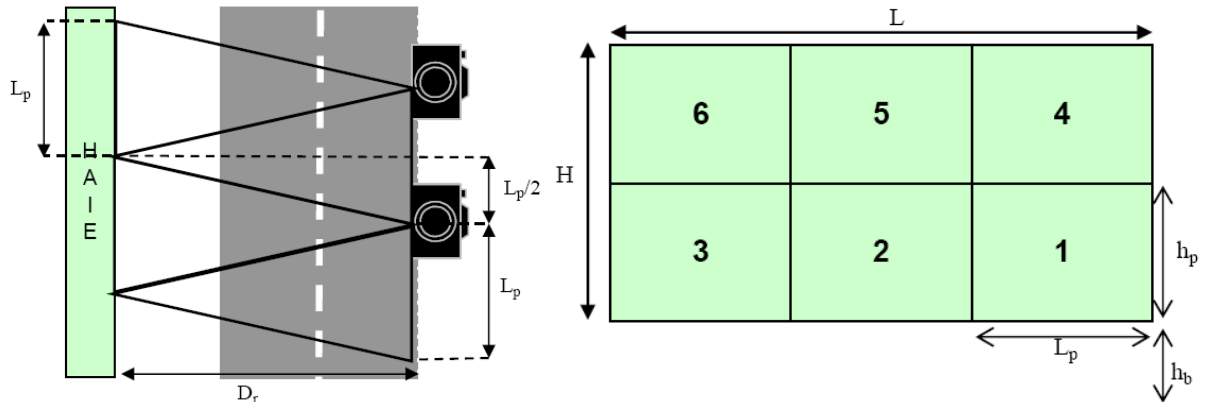


Figure 37 : A gauche, prise de photos, vue de dessus et à droite vue de face

Vient ensuite la phase de traitement sous informatique : grâce à un outil de sélection automatique d'un logiciel de modification d'image (type Baguette Magique sous ADOBE Photoshop), nous repérons les sections de branches coupées et les isolons sur un calque :

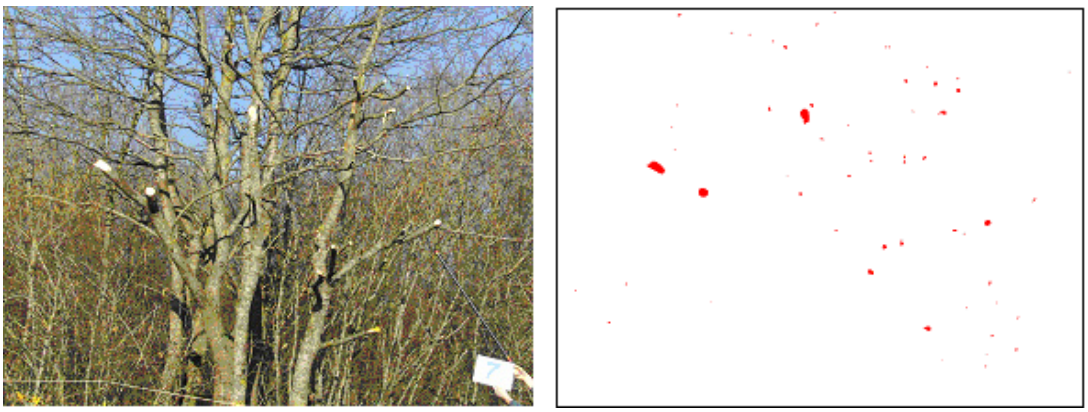


Figure 38 : A gauche, échantillon de photo de haie brut,
à droite, photo traitée avec les sections de branches coupées

Le traitement informatique se poursuit par l'utilisation d'un logiciel de traitement des images (MATROX Inspector) qui est capable de repérer les taches présentes sur le calque de la photo, de les numéroter, de les repérer dans un repère orthonormé et surtout de mesurer la surface de la tache en pixels carrés. Le logiciel édite alors un fichier texte et les données sont ensuite exploitées sous tableur (MICROSOFT Excel). Voici le type de données que l'on peut alors obtenir : les résultats présentés sont ceux d'un échantillonnage de 4 haies situées dans la région d'Epinal (88). Ce sont des haies de bords de route entretenues tous les 5 ans, constituées en majorité de feuillus divers.

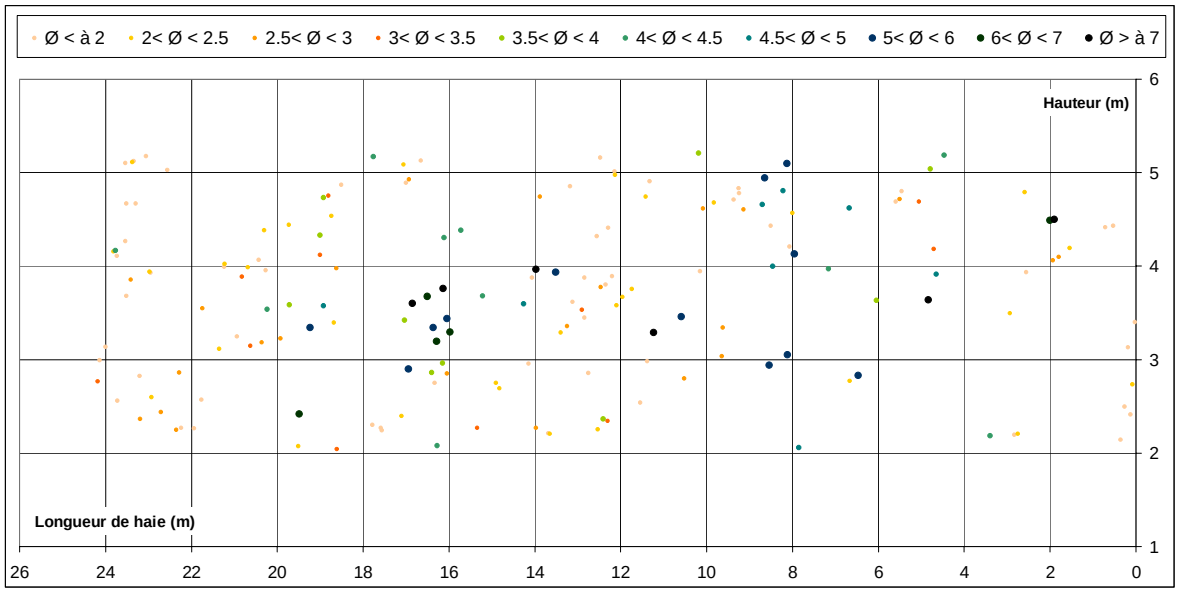


Figure 39 : Position des différentes classes de diamètre de branche (cm) sur une haie de bord de route.

Ce graphique nous montre que les branches sont bien réparties en diamètre. Les arbres de hauts jets âgés sont repérables à la concentration de branches de gros diamètres, nous remarquons également la présence d'essences arbustives produisant de nombreuses branches de faibles diamètres. Nous remarquons également que la majorité des branches a tendance à se situer entre 2m50 et 5m.

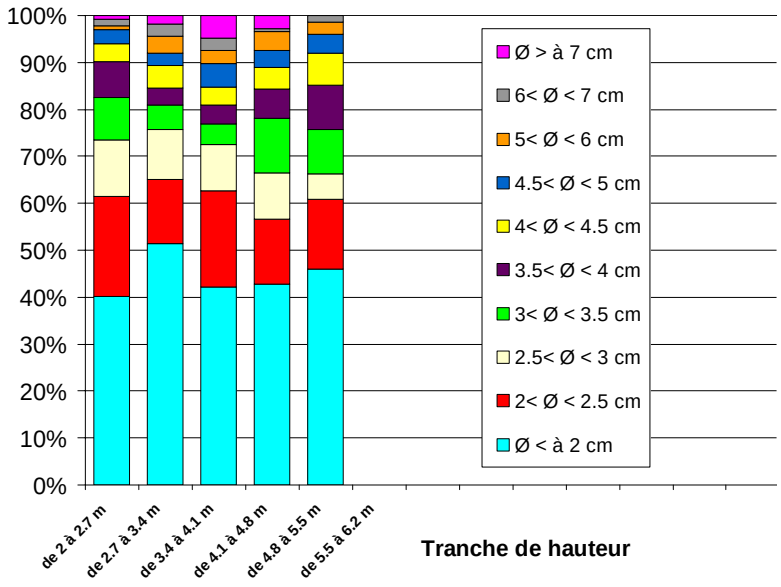


Figure 40 : Proportion des différentes classes de diamètres par tranche de hauteur de haie.

Sur cette répartition, il est clair que près de 70% des branches coupées ont moins de 3 cm de diamètre au niveau de la surface de coupe. Par contre il est également possible de faire face à des branches bien plus grosses (plus de 7 cm) mais en proportion moindre (moins de 10%). Nous sommes également capables d'obtenir ainsi une concentration surfacique de bois sur la haie :

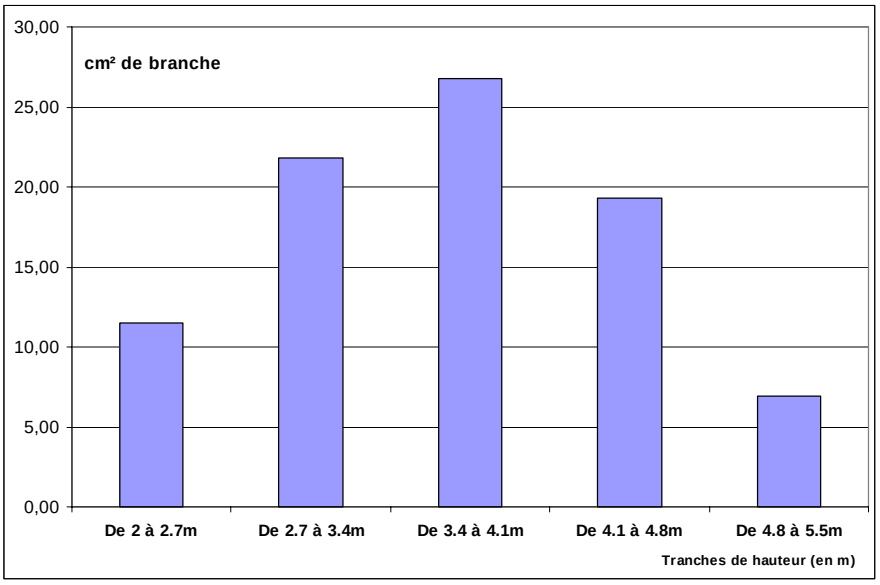


Figure 41 : Densité de surface de coupe exprimée en cm^2 de surface de coupe par m^2 de haie

La tendance précédente est de nature Gaussienne et montre que la majorité (plus de 75%) du bois coupé se situe entre 2.7 et 4.8m. Ce phénomène s'explique de plusieurs raisons : aux alentours de 2m se trouve des essences arbustives produisant des branches de faibles diamètres (parfois ignorées par les élagueurs de bords de route) et plus en altitude, les branches sont souvent plus en retrait de la route (non ou mal coupées) et également plus rares et de faibles diamètres.

Cette méthode présente l'immense avantage de conjuguer différentes méthodes modernes comme la photographie et l'imagerie informatique à des relevés sur site, ce qui la rend des plus efficaces. Grâce à cela, nous arrivons à obtenir une analyse statistique rapide d'une haie de plusieurs dizaines de mètres de long. Cette méthode ouvre des perspectives à plus long terme pour l'entreprise NOREMAT car elle permet de savoir la quantité de bois coupé le long d'un chantier déterminé. De ce fait, les entrepreneurs pourraient être capable de chiffrer précisément le travail d'élagage effectué, le bois valorisé récupéré et, en stockant ces informations d'un entretien à l'autre, d'observer l'évolution de la croissance de la haie.

2.5 Adaptation de la biomasse bocagère à la valorisation en bois énergie

Les produits connexes issus de l'élagage des haies de bords de route peuvent donc être considérés comme un combustible afin de produire de la chaleur. De nos jours, les appareils de chauffage au bois utilisent trois types de combustibles (paragraphe 1.5.3) : la bûche, le granulé et la plaquette. Après une étude de marché, cette dernière a été désignée comme forme de combustible la mieux adaptée à notre étude (paragraphe 1.5.4).

Cette forme de plaquette s'utilise dans des chaudières automatiques, qui avec adjonction d'air (comburant) produit de l'énergie par combustion. Il existe deux classes de chaudières (généralement triées selon leur puissance) et nous avons choisi celles de faibles puissances à alimentation par vis sans fin : il s'agit du type de chaudière présent pour les petites collectivités et les particuliers. Le monde des chaudières automatiques à bois, quoique relativement récent, n'en est pas moins complexe et le présent paragraphe se veut une présentation de celles-ci dans le cadre de notre projet.

2.5.1 Présentation des chaudières automatiques de faibles puissances

Par habitude et selon les constructeurs, on appelle chaudière de faible puissance, toute chaudière en dessous de 200 kW. Les appareils de chauffage de cette gamme présentent des similitudes sur ces différents organes (Figure 42). Les chaudières sur lesquelles l'entreprise NOREMAT se place ont les points suivants en commun:

- Elles sont alimentées avec du bois fragmenté dit de petite taille (taille d'un pouce),
- Elles sont alimentées mécaniquement en bois, le système par vis sans fin de première génération étant le plus contraignant pour la granulométrie du combustible.

L'amenage du combustible au niveau du foyer par vis sans fin permet de bien maîtriser la charge de la chaudière (charge de puissance) mais peut se bloquer lorsque les particules des bois n'ont pas la bonne taille. Le combustible, additionné d'une certaine quantité d'air (air dite primaire), brûle de façon maîtrisée et la chaleur produite est distribuée au réseau de chauffage grâce à l'échangeur de chaleur.

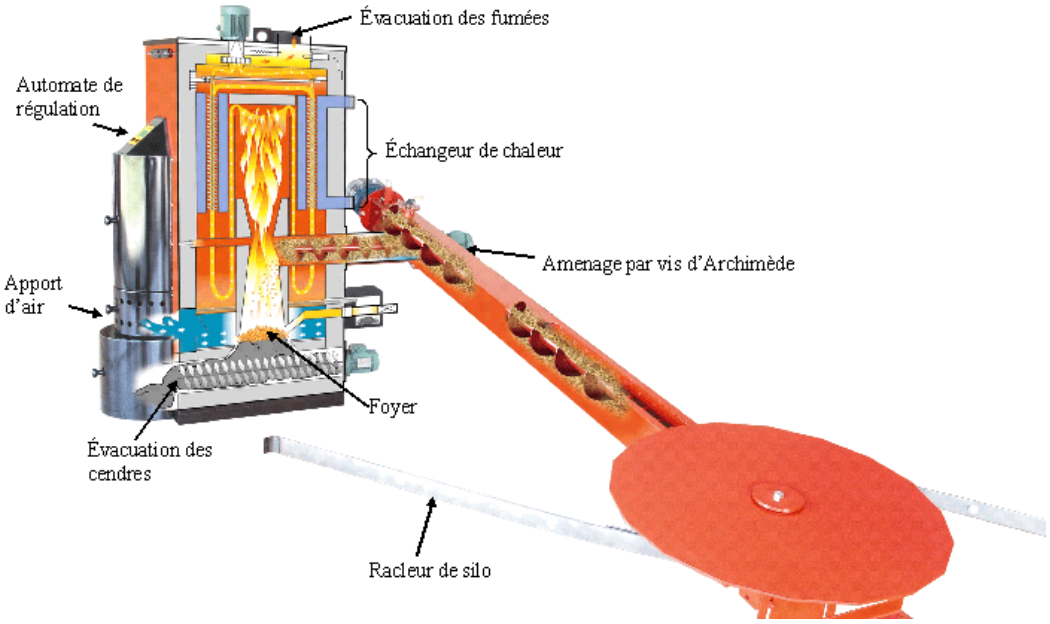


Figure 42 : Schéma de fonctionnement d'une chaudière automatique à plaquettes (source : HARGASSNER)

A chaque demande de chaleur, un automate demande aux racleurs de silo et à la vis sans fin d'acheminer le bois au foyer afin d'en augmenter sa charge. Si des plaquettes se coincent dans ce système à cause de leur taille, la chaudière ne recevant plus de bois se met en défaut et ne chauffe plus. Ce problème étant assez récurant dans le milieu, les fabricants de chaudières ont essayé de nouveaux concepts de vis sans fin à arêtes tranchantes ou avec système de retour mais le problème demeure. Les chaudières ont donc des technologies qui donnent des contraintes au niveau du combustible.

2.5.2 Caractéristiques des combustibles fragmentés pour ce type de chaudière automatique

A l'heure actuelle, peu de documents décrivent les tenants et les aboutissants de ce type de combustible et les références précises se font rares. La norme autrichienne « ÖNORME 7113 » [36] est la seule norme qui définisse correctement les caractéristiques des plaquettes bois (et en particulier la granulométrie). Malgré tout, une nouvelle norme européenne est en cours d'écriture et doit sortir prochainement sur la qualité de fabrication et de livraison des plaquettes destinées au bois énergie. Les grandeurs physiques qui caractérisent les combustibles comme la biomasse sont les suivants :

- Degré d'humidité sur brut du combustible,
- Pouvoir calorifique à cette humidité,
- La granulométrie des particules,
- Le taux de fines particules et taux de cendres après combustion.

Des protocoles de mesures existent et sont plus particulièrement détaillés en annexe 3. Aucun document n'est capable de fournir les caractéristiques exactes que les plaquettes doivent avoir. Seuls quelques fabricants préconisent un cahier des charges sous forme de fourchettes de valeurs. Les chiffres suivants représentent des fourchettes constatés auprès des contrats d'approvisionnement de plaquettes, auprès des constructeurs (ex. HARGASSNER [37]) ou encore directement auprès des fabricants :

- Degré d'humidité : max 30% sur brut,
- Energie contenue : du fait de l'humidité maximum et de l'essence de bois : min 12000 kJ/kg,
- La granulométrie : elle doit être la plus homogène possible et présenter une courbe de Gauss bien proportionnée. Une courbe bien proportionnée signifie qu'elle doit présenter une quantité plus importante de particules de taille moyenne et une quantité moindre pour les autres. De plus, chacune des trois dimensions d'une plaquette ne doit pas excéder 5 cm. Ce sont les conditions d'usinage des branches et les caractéristiques du futur outil qui détermineront la qualité granulométrique des plaquettes.

- Le taux de cendre : par habitude, on demande que le taux de cendres en masse du combustible n'excède pas 1-2%. Ce taux signifie que pour une masse anhydre de bois de 1kg mis en combustion, les résidus de cette combustion ne devront pas peser plus de 20g. Ce taux peut augmenter avec la présence d'écorces, de feuillages et de terre.
- Le taux de fines : on a coutume d'appeler « fines » ou « fines particules » toutes particules de dimensions inférieures à 1mm. Ces particules peuvent s'agglomérer dans le silo et dans la vis d'amenage et provoquer des bourrages. De plus lors de la combustion, elles peuvent être évacuées par l'air primaire et partir dans les fumées avant complète combustion. On demande que ce taux n'excède pas les 10% sur une quantité de plaquettes sèches. Ici encore ce sont les conditions de coupe qui seront déterminantes pour la production de fines.

La Figure 43 montre une répartition granulométrique idéale pour des plaquettes de chaudières de faibles puissances, cette mesure est effectuée sur des plaquettes VAXELAIRE, producteur vosgien de plaquettes forestières. Dans cette granulométrie, nous sommes bien en présence de particules calibrées entre 1mm et 1cm (pour plus de 80%) avec relativement peu de grosses plaquettes (supérieures à 2cm) ni de fines.

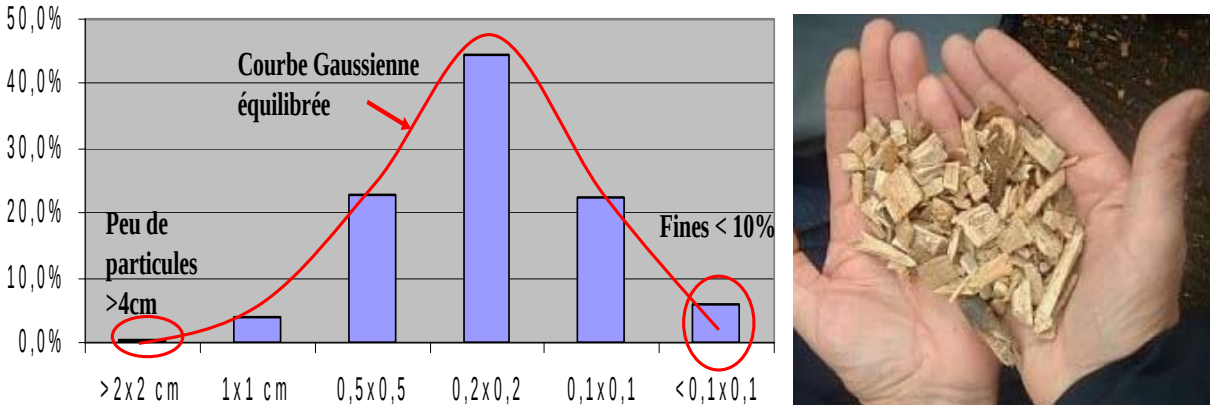


Figure 43 : A gauche, exemple d'une granulométrie correcte de petites plaquettes et à droite, photographie de plaquettes de chauffages correctement calibrées pour le chauffage

Si l'on rapproche ces données des branches de haies de bords de route, on s'aperçoit de plusieurs choses : la première est que la granulométrie sera aisée dans deux directions : radiale et tangentielle (diamètre rarement supérieur à 5cm) mais moins dans le sens longitudinal. L'idée est donc de former les plaquettes d'avantage dans l'axe de la branche plutôt que dans son diamètre.

La deuxième concerne le taux de cendres qui risque d'être plus élevé que la moyenne. En effet, dans le cas de l'élagage des haies de bords de routes, les branches, de plus faible diamètre que les troncs, possèdent davantage d'écorces et de feuilles. A tout ceci, vient s'ajouter la terre et les cailloux que les branches peuvent ramener lorsqu'elles tombent à terre. Afin de produire une plaquette à faible taux de

cendres, nous nous arrangerons donc pour couper les branches en hiver (présence moindre de feuillage) et pour ne pas les laisser tomber, l'idéal étant que les plaquettes soient directement stockées sans toucher le sol.

2.5.3 Comparaison avec les produits connexes issus de l'élagage des haies

Nous avons voulu savoir dans quelle mesure des plaquettes produites par une haie de bords de route étaient compatibles avec le précédent cahier des charges. Nous avons donc récupéré des plaquettes à la sortie d'un broyeur à disque qui était en train de broyer des branches de haies fraîchement coupées. Cette récolte a été effectuée sur une grande longueur de haie (plus de 500m) dans laquelle de nombreuses essences feuillues se côtoyaient. La récolte s'est faite au mois de janvier 2008, période à laquelle la quasi-totalité de feuillage était tombé et période habituelle d'élagage. Les plaquettes ont été récoltées à la sortie de la goulotte du broyeur avant qu'elles ne tombent à terre.

Une fois les plaquettes récupérées, nous avons effectué une série de tests visant à caractériser le combustible suivant les critères décrits précédemment. Les résultats que nous avons obtenus sont présentés Figure 44.

Caractéristiques	Normes relatives aux essais	Echantillon de produits de bords de route	Cahier des charges de chaudières
Masse Volumique Apparente	NF B51-005	330 kg/m^3	290 kg/m^3
Humidité sur brut	NF B51-004	Plaquettes vertes: 60% sur brut	20<H<30%
Pouvoir Calorifique Inférieur	NF M03-005	18 800 kJ/kg à 0% d'humidité	19 000 kJ/kg à 0% d'humidité
Granulométrie	ÖNORM 7113 Norme Autrichienne		
Taux de fines particules	ÖNORM 7113 Norme Autrichienne	2%	3%
Taux de cendres	NF M03-003	3%	1%

Figure 44 : Tableau récapitulatif et comparatifs des propriétés des déchets de bords de route par rapport au cahier des charges des chaudières

Tout d'abord, la masse volumique humique du combustible est légèrement supérieure à celle préconisée par les chaudières : cette différence vient du fait que lorsque les plaquettes ont été produites, elles étaient très humides, environ 60% sur brut contre 30% pour le cahier des charges. Il est facile de réduire la masse volumique et l'humidité en séchant les plaquettes en tas par exemple. C'est le cas pour les plaquettes livrées. Une fois celles-ci sèches, le taux de fines particules est satisfaisant, l'énergie contenue également, mais le taux de cendre légèrement supérieur au cahier des charges. Cette valeur provient du fait que les plaquettes produites contenaient encore un peu de feuillage et surtout beaucoup plus d'écorces que pour des plaquettes issues du broyage de billons de gros diamètres.

Nous n'avons pas mesuré la granulométrie du combustible car celle-ci étant dépendante du broyage, elle n'a que peu d'intérêt pour le moment.

2.6 Conclusion du chapitre

Lors de la fabrication des plaquettes par le nouvel outil, nous devrons donc être vigilants sur deux paramètres essentiels : l'humidité et le taux de cendre. L'humidité pourra se maîtriser par le stockage en tas et le séchage des plaquettes, alors que le taux de cendre devra être surveillé et limité à cette valeur. Nous pourrons limiter cette valeur en encouragent un entretien plus espacé dans le temps (diamètre des branches plus grand) et en limitant le contact des plaquettes avec le sol qui pourrait apporter des éléments minéraux.

Il ne faudra également pas oublier la granulométrie des plaquettes qui restera le paramètre le plus important, paramètre qui dépendra des conditions de coupe et des paramètres d'outillage du futur outil. La maîtrise de ces paramètres de coupe et d'outillage fait l'objet du chapitre suivant

.

Chapitre 3. LA PRODUCTION DE COPEAUX ET DE PLAQUETTES PAR COUPE ROTATIVE DU BOIS

Ce chapitre traite des moyens bibliographiques qui ont permis l'analyse de la coupe et du broyage de matière ligneuse. Cette analyse a permis la compréhension des phénomènes de coupe et ainsi la bonne conception du futur outil. Cette partie traite donc de généralités sur la coupe du matériau bois et des systèmes de production de plaquettes que sont les broyeurs forestiers et les canters de scierie. En effet, ces systèmes de coupe possèdent de nombreuses caractéristiques favorisant la fabrication de plaquettes. Lors de l'étude, de nombreux systèmes de coupe/broyage ont été envisagés (annexe 6) mais seuls ces deux-là seront traités dans ce chapitre (paragraphe 1.5.4).

3.1 La fabrication de copeaux traditionnels

3.1.1 Généralités scientifiques à propos de l'usinage du matériau bois

La coupe du bois est un processus complexe qui met en œuvre de nombreux facteurs modifiant celui-ci. L'essence utilisée, les efforts de coupe, l'outillage, les états de surface, les vitesses d'amenage et de rotation, les effets thermiques et électrochimiques, l'humidité sont autant de paramètres qui agissent sur la coupe du bois. C'est l'analyse de ces différents facteurs et leurs influences qui permet de mieux comprendre les processus d'usinage.

La coupe se caractérise par un mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce. La pièce peut être fixe, posséder un mouvement d'avance ou un mouvement de rotation (tournage, déroulage…) [MARTIN ;38]. Dans notre cas, la branche est fixée au tronc à sa base, peut osciller autour de cette fixation et c'est l'outil qui vient la couper. Le mouvement de coupe de l'outil peut être de plusieurs ordres :

- De rotation : scie circulaire, fraise, outil de broyage, rotor…
- De translation orthogonale à l'avance : sécateur, barres de coupe, scie alternative…

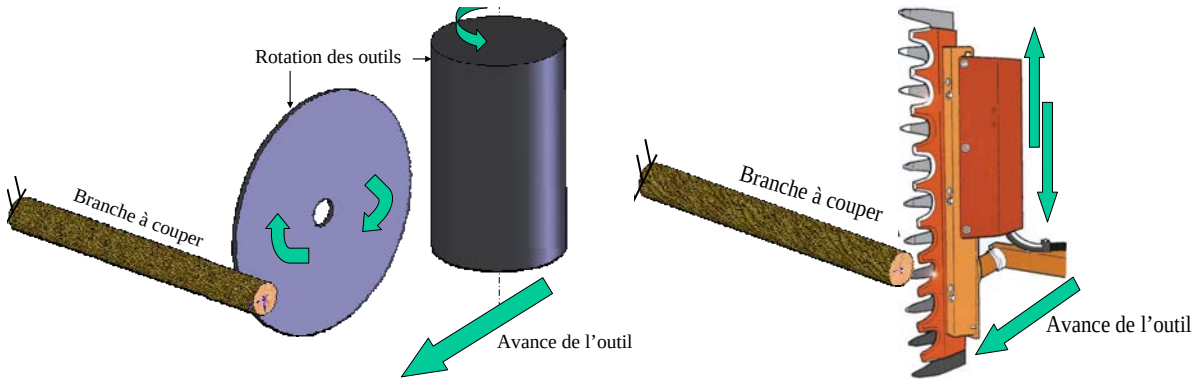


Figure 45 : à gauche principe des outils de rotation et à droite celui des translations orthogonales.

Le mouvement par translation orthogonale a été éliminé pour la conception de l'outil car il présente plusieurs inconvénients : tout d'abord, il implique des mouvements de va-et-vient avec des pièces

imposantes et induit ainsi des vibrations non négligeables dans le bras de la machine. Ensuite, si l'on veut réduire ces vibrations, ces outils travaillent en vitesses de coupe lente (0.1m/s pour le sécateur NOREMAT) ce qui interdit une cadence suffisante pour la fabrication de plaquettes en continue.

Lorsque le mouvement de la pièce s'oppose à la trajectoire de l'arête de coupe, on dit que l'on travaille en opposition, si l'avance se fait dans le même sens, le travail s'effectue en avalant. Il est parfois délicat de juger le sens de travail pour certains outils : le sécateur par exemple possède un mouvement de coupe perpendiculaire à l'avance du bois (Figure 45) et le lamier possède deux zones de travail (Figure 46). En effet, si la branche est coupée au dessus ou en dessous du moyeu de rotation de la lame, le travail change.

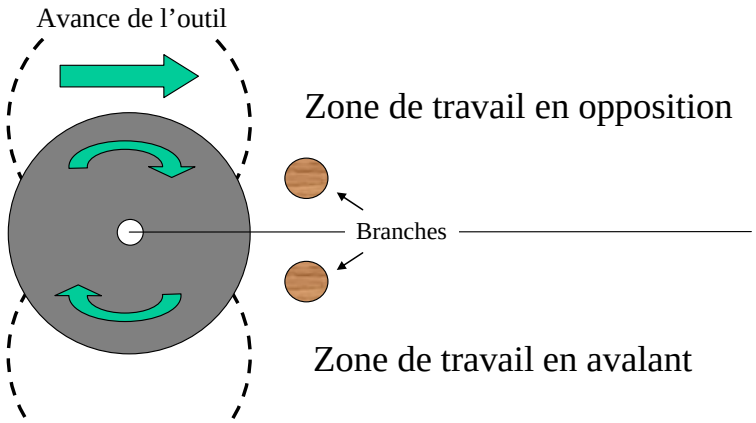


Figure 46 : Représentation des deux zones de travail d'une lame de lamier

L'usinage du bois consiste en une transformation de la matière à usiner par passage successif d'un élément coupant. L'usinage, ainsi défini, génère deux produits très importants : le premier est la pièce de bois restante avec la surface créée par le passage de la dent et le deuxième est la partie de bois enlevée par ce même passage : le copeau. En ce qui nous concerne, le futur outil sera en mouvement relatif par rapport à la branche d'arbre. La pièce de bois restante est la branche fraîchement coupée restée sur l'arbre et la partie de bois enlevée est la plaquette de chauffage produite. Les recherches effectuées sur l'usinage « classique » du bois peuvent s'appliquer ici car nous sommes dans les mêmes problématiques de formation du copeau et dans l'interaction du « couple outil-matière ». C'est pour cette raison, que l'étude de la littérature de ce chapitre s'appuie sur des recherches en usinage du matériau bois.

3.1.2 Modes de coupe :

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de s'étendre sur des détails biologiques du matériau bois, acquis depuis longtemps auprès de tout ceux qui sont familiarisés avec cette matière. Cependant il est important de préciser certaines choses : le bois possède une nature anisotropique, ce qui signifie qu'il ne se comporte pas de la même façon suivant la direction que l'on choisit de solliciter. En effet, ses

propriétés aussi bien mécaniques, physiques, thermiques, biologiques se trouvent foncièrement différentes suivant les directions considérées [KELLER ;39]. Biologiquement parlant, la croissance d'un arbre s'effectue suivant deux étapes successives : une croissance longitudinale et l'autre radiale, en formant des couches concentriques. De part sa constitution matricielle, on définit alors trois directions privilégiées (plans de référence) (Figure 47): la direction radiale : R, la direction longitudinale : L, la direction tangentielle : T. Cette particularité du matériau bois se retrouve de façon évidente dans les ramifications de l'arbre et, par conséquent, aura de l'influence sur l'étude de la coupe d'éléments flexibles tels que les branches de haies.

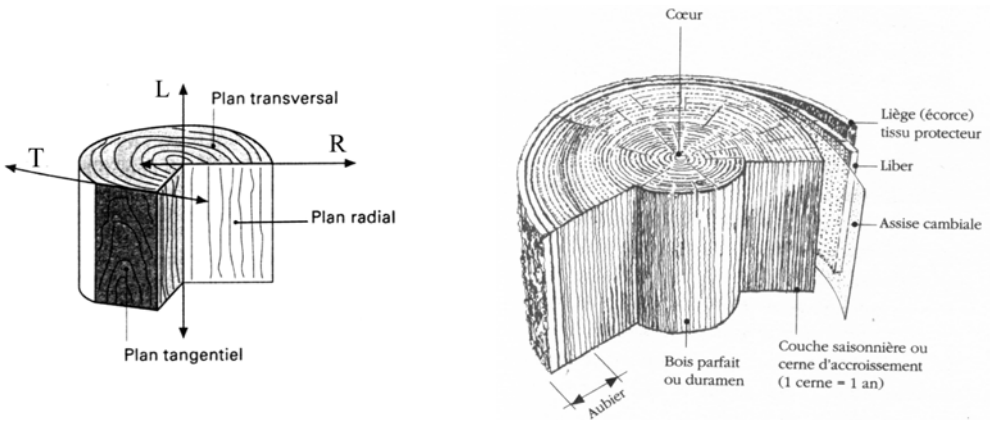


Figure 47 : A gauche : direction d'anisotropie, à droite : structure par cernes du bois

Pour la coupe du bois, il est alors nécessaire de définir trois plans notés A, B, C qui correspondent à trois modes de coupe (Figure 48). Dans chacun de ces trois modes, l'arête de coupe ne se place pas de la même façon par rapport aux fibres [KIVIMAA ;40].

- A : Coupe transversale (tronçonnage, tenonnage, broyage)
- B : Coupe perpendiculaire au fil (rabotage, délignage, toupillage)
- C : Coupe dans le fil (tranchage, déroulage)

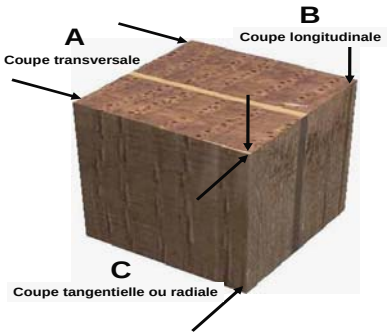


Figure 48 : Définitions des modes de coupe

Certains auteurs comme McKENZIE ont mis en place une autre notation faisant intervenir deux angles :

- Le premier est celui formé par l'arête de l'outil et la direction des fibres du bois.
- Le second est celui entre la direction de la vitesse d'avance et la direction des fibres du bois.

Cette annotation est plus précise et permet, de plus, de mieux définir les coupes obliques (géométries spéciales).

Orientation		Exemples d'opérations d'usinage	Coupe
1	90-90	Sciage à ruban *(délignage)*	A
2	90-0	Corroyage	B
3	0-90	Tenonnage par dérouleur *(petite passe)*	C
4	0-90	Tronçonnage	C
5	90-0	Toupillage avec faible passe	B
6	90-90	Fraisage en bout	A

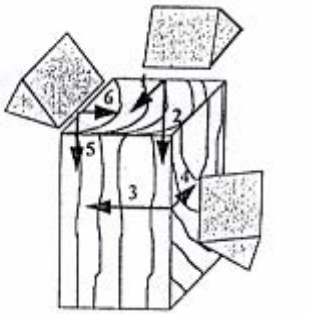


Figure 49 : Définition des modes de coupe par MC KENZIE [41]

La définition de ces modes de coupe est de la première importance puisque vont en découler, entre autre, des variations importantes de types de copeaux et d'efforts de coupe. On conçoit, par exemple, qu'un copeau issu d'une coupe A soit différent de celui issu d'une coupe B et lui même aussi différent d'une coupe C. Signalons également que les efforts de coupe peuvent varier de 1 à 4 suivant le mode de la coupe comme le montre la Figure 50.

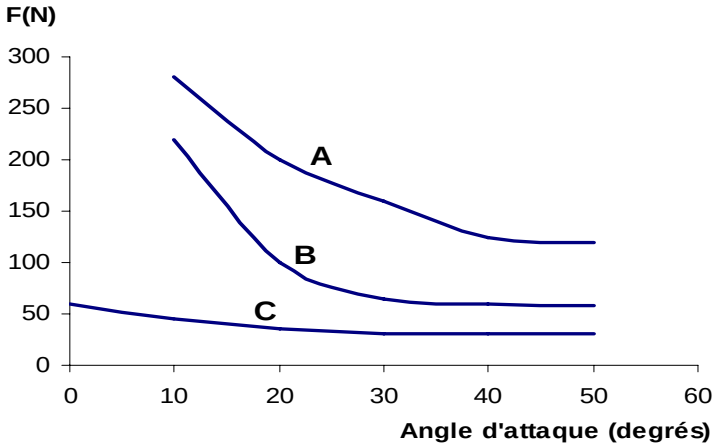


Figure 50 : Variation de l'effort de coupe suivant les modes A, B ou C pour du Hêtre à 12% d'humidité, copeau de 0.2mm d'épaisseur, outil usé à 50% [MARTIN ;38]

3.1.3 Géométrie de coupe

Quel que soit le matériau que l'on coupe, la géométrie de la dent d'un outil et sa position par rapport au matériau à couper sont définis à l'aide de trois angles (Figure 51) : l'angle de coupe (γ), l'angle de taillant (β) et l'angle de dépouille (α). La somme de ces angles, en degré, est par définition égale à 90°.

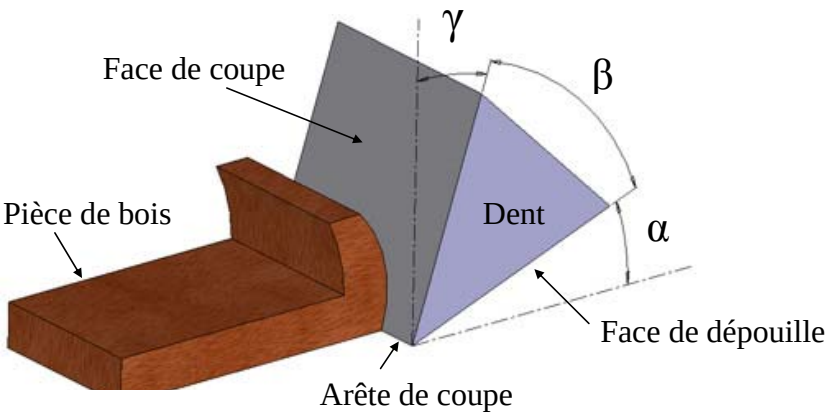


Figure 51 : Définition des angles [NF E 66-502 et 504 ;42 et 43], composition fonctionnelle de la dent

L'angle de coupe (et donc la face de coupe) dégage le copeau et conditionne la pénétration de l'arête. Un angle faible provoque un effort de coupe important, dû à la compression du bois lors de la pénétration, de plus la dent a tendance à gratter le bois plutôt que de le couper. Un angle important aide à la pénétration de l'arête de coupe dans le matériau et diminue ainsi les efforts mais le décollement des fibres est accentué et l'arête devient friable. On note aussi, dans ce cas, une baisse de la qualité d'état de surface.

L'angle de dépouille est pratiquement constant suivant les usinages (de 2° à 8° constaté généralement), s'il est trop faible, l'arête frotte contre le bois usiné et s'échauffe, s'il est trop important l'arête se fragilise.

L'angle de taillant conditionne la résistance mécanique de la dent à l'usinage et la pénétration de l'arête dans le bois. En fonction des propriétés mécaniques du matériau constituant l'arête et des efforts de coupe mis en jeu, on choisira un angle de taillant plus grand pour plus de résistance. Dans le cas de l'usinage de branches, nous pouvons choisir un angle un peu plus faible que la moyenne afin de faciliter la pénétration de l'arête de coupe dans la branche.

3.1.4 Qualité d'état de surface

Nous l'avons vu précédemment, les paramètres d'outillage et de coupe influencent la qualité d'état de surface de la pièce usinée. Implicitement le terme « qualité » doit obligatoirement définir un référentiel de qualité : d'ordinaire une pièce est dite « de qualité » si elle satisfait un besoin client. Pour le

rabotage par exemple, une surface rabotée possèdera une qualité suffisante si elle est en accord avec la suite du process de fabrication d'un produit : assemblage, finition… Pour l'élagage des haies de bords de route, plus que dans n'importe quel domaine, il est très difficile de préciser les critères qui feront que l'entretien de la haie sera de qualité pour le client. On peut distinguer plusieurs critères sur lesquels peut porter la qualité :

- l'allure générale de la haie autrement dit si la coupe de la haie forme un beau plan dans l'axe de la route,
- l'état de surface des tronçons de coupe des branches restées sur l'arbre.

Le premier critère est dépendant, en grande partie, du professionnalisme du chauffeur de la machine destinée à l'entretien. Pour le second, il n'existe pas de normes précisant les choses et cela reste la plupart du temps à l'appréciation du client. A titre d'exemple les deux photos suivantes illustrent tout ceci par deux branches : l'une « satisfaisante » coupée par lamier à couteaux et l'autre « mauvaise » par un rotor à marteau. Cette appréciation m'a été donnée par l'expérience des personnes de métier lors de visites sur chantiers.

Figure 52 : Exemple d'états de surface de branches récupérées après un chantier d'élagage, état dit « satisfaisant » à gauche et état dit « mauvais » à droite.

3.1.5 Efforts de coupe

L'étude des différents efforts agissant sur l'outil au moment de la coupe est une problématique qui a fait couler beaucoup d'encre et qui est désormais un passage obligé pour l'étude de la coupe. En pénétrant dans la matière pour former le copeau, la dent exerce une sollicitation sur le bois qui résiste lui-même : c'est le déséquilibre de ces efforts en faveur de la dent qui va favoriser l'usinage. Selon la norme [NF E66-507 ;44], l'effort de coupe peut se décomposer en deux génératrices : l'une dans une direction parallèle au mouvement d'avance et l'autre selon une direction normale à la surface générée (Figure 53).

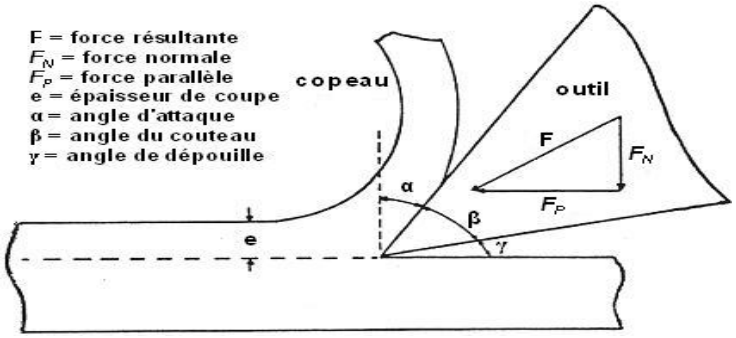


Figure 53 : Géométrie de coupe et composantes des forces de coupe [KOCH ;45]

Sur la Figure 53, on note bien la représentation schématique des deux composantes de l'effort de coupe provoqué lors de la formation du copeau. Dans l'hypothèse où la pièce de bois est une branche à usiner par un outil rotatif, nous sommes en présence des mêmes composantes.

3.1.6 Formation du copeau

3.1.6.1 Types de copeaux [FRANZ, 1958]

L'examen de la coupe rotative par FRANZ [46] en 1958, révèle l'existence de deux phases dans la formation du copeau (Figure 54): typiquement, en coupe dans le fil, il se forme, dans un premier temps un copeau recourbé d'épaisseur croissante et, à un point critique, une rupture se produit terminant la formation du copeau. Cette seconde phase, contrairement à la première, n'est pas maîtrisée et dépend, par exemple de l'angle de fil.

A la suite de la première phase, il apparaît une surface « de qualité » alors que la seconde phase laisse une surface irrégulière qui persiste jusqu'à l'éventuel enlèvement par les formations successives de copeaux.

Figure 54 : A gauche : Première phase, recourbement du copeau et à droite : rupture

Les observations à la caméra ont conduit FRANZ [46] à décrire trois types de copeaux : Type I, II et III. McKENZIE [47], par la suite, en ajouta un quatrième sous le nom de Type 0 à propos du tranchage. La différence entre les trois principaux types se fait sur l'endroit où s'effectue la rupture.

Le type I est formé quand les conditions de coupe sont telles que le bois se fend devant l'arête. Une partie du copeau est formée par l'action directe de la dent (tranchage) mais la zone de fissuration (fendage) est située en aval de l'arête de coupe. Il y a ensuite rupture, le copeau étant assimilé à une poutre encastrée en flexion. Ce copeau est très peu pratiqué car la direction et la longueur de la fissure ne sont pas maîtrisables sur la surface usinée. Une fois que l'arête de coupe a pénétré la matière et provoqué la fissuration, un copeau de taille importante se détache en consommant que peu d'efforts de coupe. L'usure de l'arête de coupe par frottement est également faible. Les conditions qui favorisent la formation de ce type de copeau sont entre autre l'emploi d'un angle d'attaque élevé (supérieur à environ 25°) de même qu'une épaisseur de copeau trop grande.

D'autre part, étant donné que la résistance du bois au fendillement longitudinal est faible, la production de copeaux de type I est associée à une faible consommation d'énergie de la machine-outil.

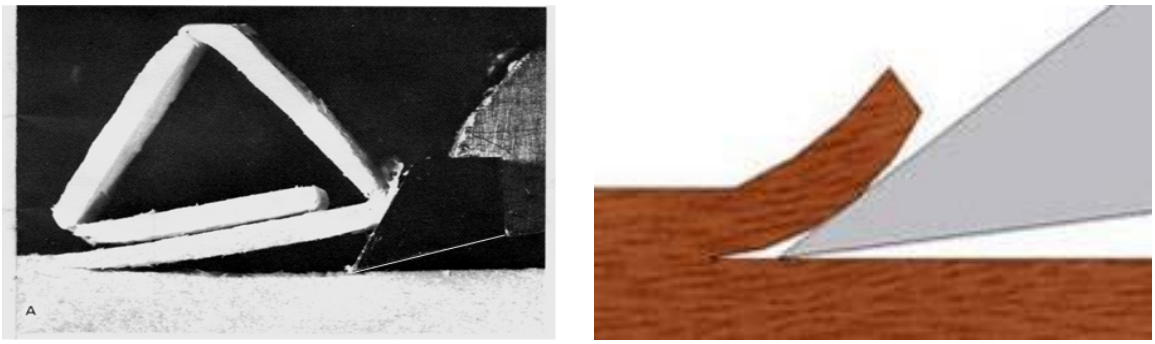


Figure 55 : Copeau de Type 1, « continu » photo (KOCH) et schéma

Dans le cas de l'usinage de branches par l'outil de laboratoire, nous recherchons l'épaisseur des plaquettes, la faible consommation d'énergie et la faible usure alors la qualité d'état de surface est bien moins exigeante que le rabotage par exemple. Le copeau de type I est donc tout désigné pour réaliser de belles plaquettes dans de bonnes conditions. C'est également la formation de copeau qui possède la plus grande capacité de coupe, puisqu'à chaque passage de dents, les copeaux produits sont plus épais.

Pour le type II, le mouvement de l'outil déforme le bois devant l'arête tranchante en compression longitudinale et provoque des contraintes de cisaillement diagonales. La rupture du bois se produit le long d'une ligne qui s'étend à partir de l'arête tranchante de l'outil, formant ainsi un copeau en continu. Le copeau de type II représente ainsi l'idéal du point de vue de la qualité de surface en rabotage.

Nous l'avons vu, la formation de copeau de type I génère de mauvais états de surface pour le rabotage ; ce n'est pas le cas pour la coupe des haies ou le niveau d'exigence est plus faible. C'est pourquoi, une configuration de coupe favorisant la formation de copeau par fendage avec un angle de coupe important, favorisant la pénétration de l'arête de coupe dans la branche est une solution envisageable. Une maîtrise de la formation des copeaux par fendage est donc nécessaire.

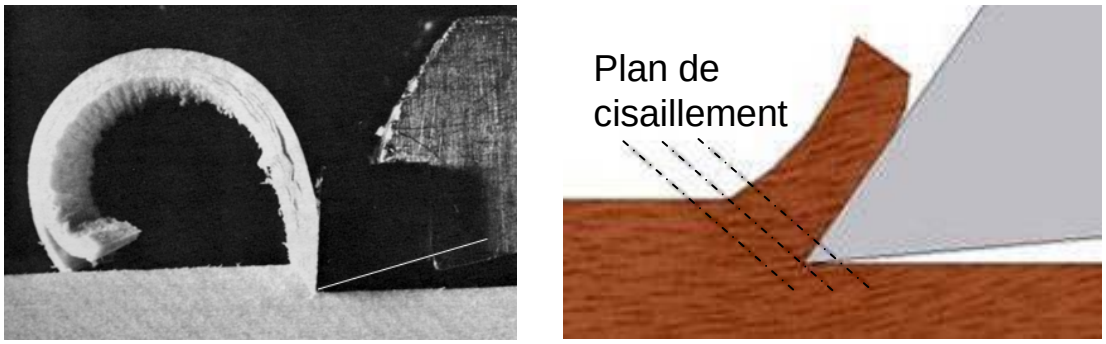


Figure 56 : Copeau de Type 2, « à compression faible » photo (KOCH) et schéma

Le copeau de type II est encore acceptable pour notre usinage mais reste moins avantageux que le type I car ce sont des copeaux épais et solides mais la consommation d'énergie est supérieure. Il s'agit en quelque sorte de « sur-qualité » dans notre cas.

En ce qui concerne le type III, dès sa pénétration, l'outil comprime longitudinalement le bois devant la dent comme pour le copeau de type I. Cette fois, un angle de coupe et une prise de passe faibles entraînent la formation d'un bourrelet de bois devant la dent. Cette action de raclage du bois provoque des états de surfaces pelucheux.

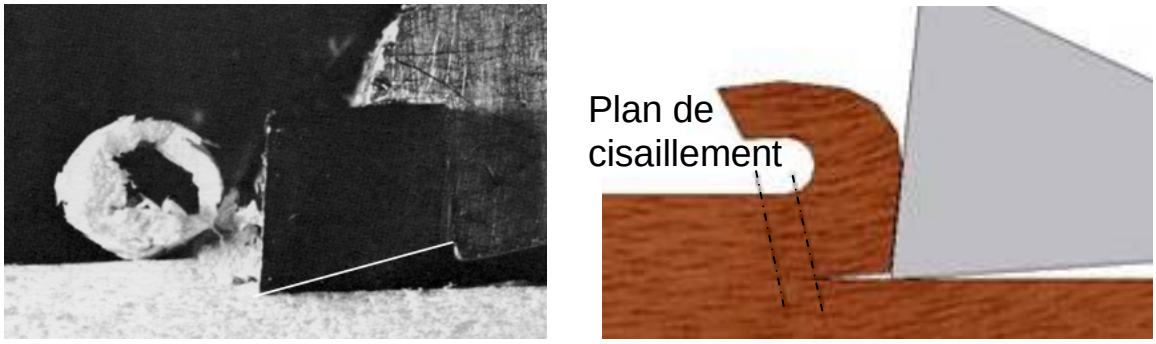


Figure 57 : Type 3, « à compression forte » photo (KOCH) et schéma

Le type III est largement déconseillé dans notre cas, nous frottons la branche, sans la couper, consommons de l'énergie et produisons que des petits copeaux, fragile. Avec ce type de copeau, nous nous exposons à des phénomènes de raclage de la branche par la dent, des vibrations de celle-ci et du coup, un mauvais état de surface.

3.1.6.2 La formation du copeau par coupe rotative

Lors de la formation d'un copeau par coupe rotative, l'épaisseur de copeau ainsi que l'orientation des efforts de coupe varient continuellement. Pour le travail en opposition, Juan [48] différencie trois phases. Au début, le copeau est très fin et dans le cas où l'angle de coupe est faible, la direction de coupe se rapproche de l'angle fil du bois. Nous sommes en présence de formation de copeau par

flambage comme pour le copeau de type III. Dans la phase centrale, le copeau s'épaissit et se forme en type II. A la fin de l'usinage, le copeau est plus épais, la composante normale est plus importante il y a alors risque de rupture du copeau par fendage comme pour un copeau de type I. C'est pour cette raison que des copeaux formés en coupe rotative ont généralement une forme de virgule.

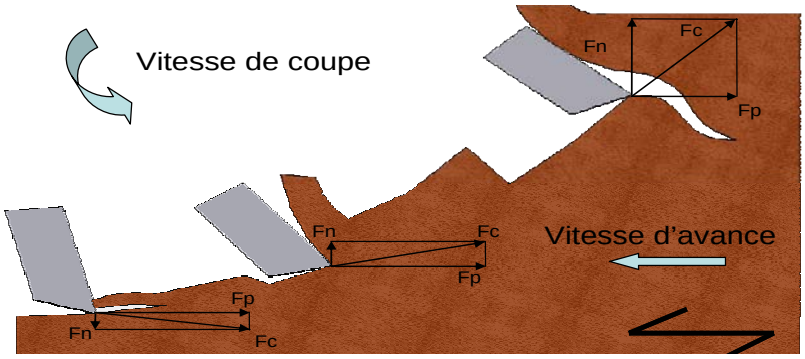


Figure 58 : Formation du copeau en coupe rotative en opposition adapté de BOUCHER [49]

La génération de copeaux par coupe rotative du bois est le résultat de l'interaction entre de nombreux paramètres comme le montre la Figure 59.

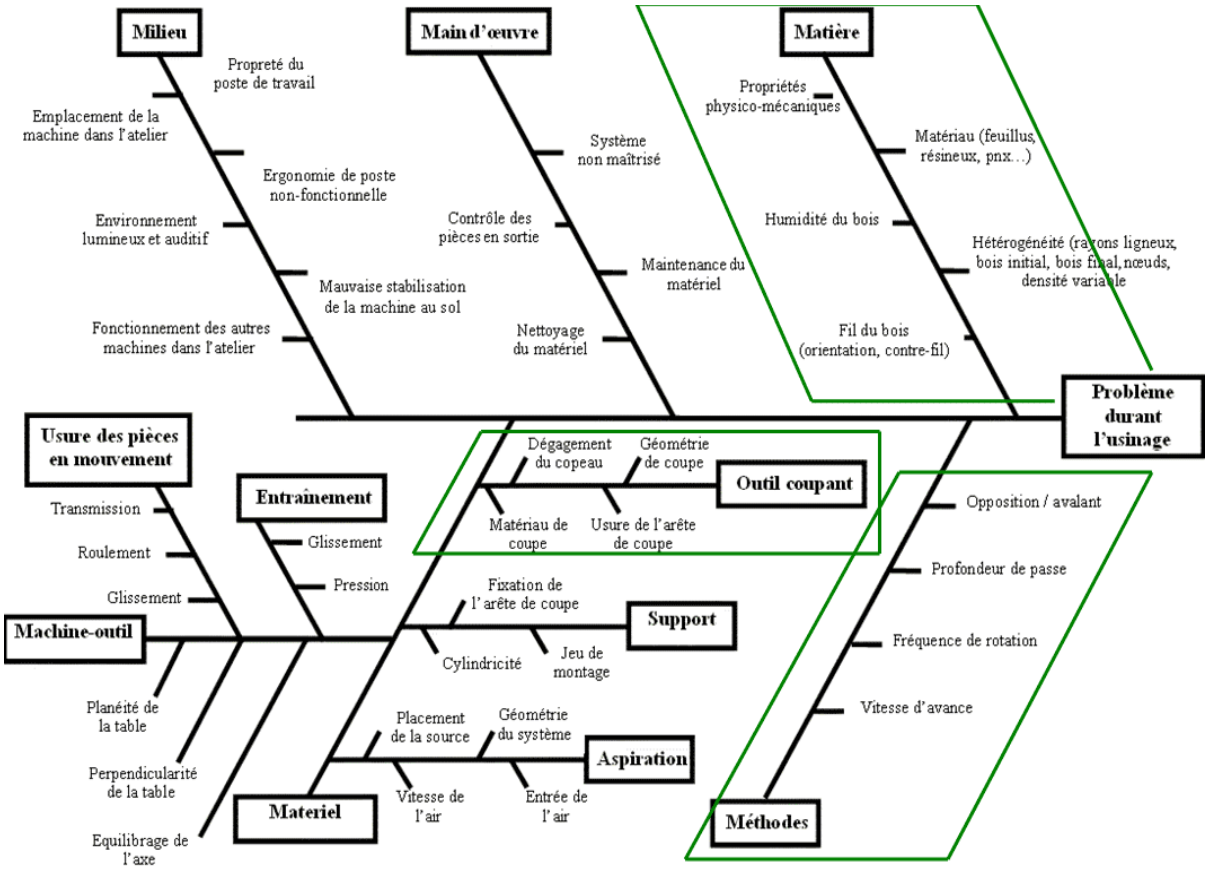


Figure 59 : Diagramme causes-effet recensant les causes possibles des problèmes pouvant intervenir en usinage bois [BOUCHER ;49]

Pour notre étude, seuls trois domaines de paramètres sont similaires à l'élagage des bords de route :

- Les facteurs liés au matériau coupé
- Les facteurs liés au procédé de coupe
- Les facteurs liés au système de coupe

Non pas que ce type d'usinage ne peut pas avoir de problèmes traitant des mêmes domaines que le diagramme précédent, mais ceux-ci peuvent être de natures différentes et ne font donc pas l'objet de cette étude. Ces différents paramètres sont traités dans les paragraphes suivants. Le diagramme causes-effet de l'élagage des haies de bords de route se situe paragraphe 5.1.1 car il argumente le choix des paramètres pour les essais de laboratoire.

3.1.7 Paramètres d'usinage : facteurs liés au bois

3.1.7.1 Facteur de densité du bois: (Coefficient d'essence Ke)

Le bois possède de multiples singularités liées la plupart du temps à sa croissance en tant qu'arbre et il n'est pas rare de se trouver confronté à des nœuds, du contre fil, des bois de tension ou de compression qui influent grandement sur les efforts de coupe au niveau local. La dureté du bois liée à sa densité influence fortement la pénétration de l'arête de coupe dans la matière ainsi que le détachement des copeaux, les efforts de coupe s'en trouvent alors grandement modifiés. La Figure 60 donne la valeur du coefficient d'essence Ke nécessaire à l'estimation des efforts de coupe. Ces coefficients sont basés sur les expériences de KIVIMAA [40] puis complétés par FISCHER [50] ou McKENZIE [51]. La référence est le hêtre avec un coefficient de 1 et un cœfficient plus important signifie que sa densité est supérieure à celle du hêtre et que par conséquent, à conditions équivalentes, cette essence sera plus dure à usiner. Ce coefficient est également important dans notre cas puisque, même si le futur outil ne sera pas amené à couper des essences exotiques, il reflète la diversité des essences de bois, diversité également présente dans les haies françaises.

Bois	Coefficient	Matériaux dérivés	Coefficient
Balsa	0,5	Contre-plaqué	1,2 à 1,5
Peuplier	0,7	PP	1,2
Sapin	0,8	PPSM	2,7
Hêtre	1 (référence)	PP: Panneaux de particules; PPSM: Panneaux de particules surfacés mélaminés.	
Niangon	1,2		
Sipo	1,3		
Chêne	1,4		
Acajou	1,5		
Méranti	1,5		
Makoré	1,7		
Azobé	2,1		

Figure 60 : Valeurs de Ke, rapportés au hêtre sec (12%), angle d'attaque 30°

Les travaux de thèse de EYMA [52] portent sur l'exploration des propriétés mécaniques du bois en vue d'obtenir une meilleure prédiction des efforts de coupe. Il propose ainsi un modèle faisant intervenir, pour chaque matériau considéré, l'infra densité ID sans unité, le module d'élasticité en compression Ec en MPa et la pente élastique de ténacité (mode I) Pf, I en MPa. Cette relation montre bien à quel point les facteurs mécaniques des essences sont importants pour l'estimation de l'effort de coupe en usinage.

$$F_{C,\text{feuillus}} = \left(0{,}0031 \cdot E_C / ID\right) + \left(0{,}00139 \cdot P_{f,I}\right) \qquad R^2 = 0{,}80$$

Figure 61 : Formule d'estimation de l'effort de coupe en fonction des données mécaniques du matériau bois [52].

3.1.7.2 Humidité : (coefficient d'humidité Kh)

Avant toute chose, il est important de préciser que dans le domaine de l'usinage, l'humidité est généralement utilisée sur sec, contrairement au domaine du bois énergie qui l'utilise sur brut. Dans le premier cas nous effectuons un rapport massique de l'eau présente dans l'échantillon par rapport à sa masse sèche et dans le deuxième c'est par rapport à sa masse humide. C'est pour cela que, à quantité d'eau équivalente, les humidités de bois usinés sont supérieures à celles des bois brûlés. L'humidité est un paramètre important qu'il ne faut pas prendre à la légère lorsque l'on parle du bois : elle influe sur les propriétés mécaniques de celui-ci et donc sur la formation du copeau par cisaillement. J. BOUCHER [53] a montré que la proportion de copeaux de type I et de type III augmentait pour une humidité du bois inférieure à 10% et supérieure au point de saturation des fibres. Dans le cas des haies de bords de route, l'humidité avoisinant les 50%, nous sommes bien concernés par cette étude. De plus, l'humidité diminue l'usure des outils surtout dans le cas de bois abrasifs. Les principaux travaux traitants de l'humidité du bois sur l'usinage ont été faits par KIVIMAA [40], McKENZIE [47] et KOCH [45] (Figure 62). Le coefficient Kh est alors créé sur la base d'un usinage de hêtre à 12% d'humidité sur sec avec une épaisseur moyenne de copeau de 0.2mm (paragraphe 3.1.8.2).

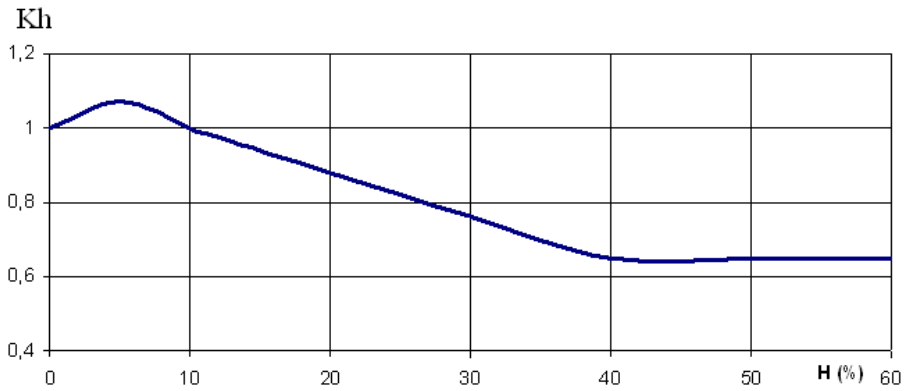


Figure 62 : Influence de l'humidité du bois sur l'effort de coupe tangentiel (Hêtre, Em=0,2mm) [KIVIMAA ; 40]

Pour avoir effectué des mesures sur des branches de haies vosgiennes en septembre 2007, l'humidité relevée tournait autour de 50-60% sur sec. On note que dans cette zone, le coefficient Kh est stable aux environs de 0,65.

3.1.8 Paramètres d'usinage : facteurs liés à la coupe

3.1.8.1 La vitesse de coupe

A conditions équivalentes, la vitesse de coupe n'a que peu d'influence sur l'effort de coupe lors de l'usinage. Cependant pour chaque matériau à usiner, la vitesse de coupe conditionne la pénétration de l'arête de coupe dans le matériau pour la formation du copeau. Pour un diamètre de coupe D (m), une vitesse de rotation de l'outil N (tr/min), la vitesse de coupe en m/s est donné par l'expression :

$$Vc = \frac{\pi * D * N}{60}$$

3.1.8.2 Epaisseur du copeau

L'épaisseur moyenne de copeau est un facteur important du point de vue de la qualification de l'usinage. La plupart des différents paramètres de conditions de coupe interviennent lors de la formation du copeau et l'épaisseur du copeau permet de la quantifier. Vf est la vitesse d'avance en m/min, N toujours la vitesse de rotation en tr/min, Z, le nombre de dents de l'outil, h la prise de passe de l'outil en mm et D le diamètre de coupe de l'outil en mm.

$$e_{moy} = \frac{V_f}{N \cdot Z_{(moy)}} \cdot \sqrt{h/D}$$

Il est désormais établi que l'épaisseur moyenne de copeau conditionne un état de surface après un usinage : pour des épaisseurs fines (0,05 à 0,15 mm) le travail est dit soigné (ou de finition) alors que pour les travaux d'ébauche (ou de dégrossissage), les épaisseurs sont plus importantes (jusqu'à 0,5 mm). Lors d'usinages particuliers tels que les canters de scieries, par exemple, il n'est pas rare de voir des épaisseurs de copeaux bien plus importantes: cet usinage en coupe B produits des copeaux pouvant aller jusqu'à 8-10mm d'épaisseur. Dans ce cas, le calcul théorique de l'épaisseur de copeau ne rejoint pas toujours la réalité des plaquettes produites.

3.1.8.3 Modes de coupe

Dans les travaux de KIVIMAA [40] puis ceux de MARTIN [38], on retrouve l'évolution linéaire des efforts de coupe en fonction de l'épaisseur moyenne de copeaux pour les trois modes de coupe principaux. On peut estimer que les efforts dépendent linéairement de Em (Figure 63). En effet, Il parait clair qu'il faille dépenser d'avantage d'énergie pour arracher de gros copeaux que pour des plus petits. Sur le même graphique on peut observer la forte influence du mode de coupe sur les efforts de

coupe. Le caractère orthotrope du matériau bois se retrouvant dans les branches d'arbres, il sera clairement plus facile d'usiner un branche en la fendant dans le sens des fils (coupe A) que en voulant la tronçonner perpendiculairement aux fils (coupe C).

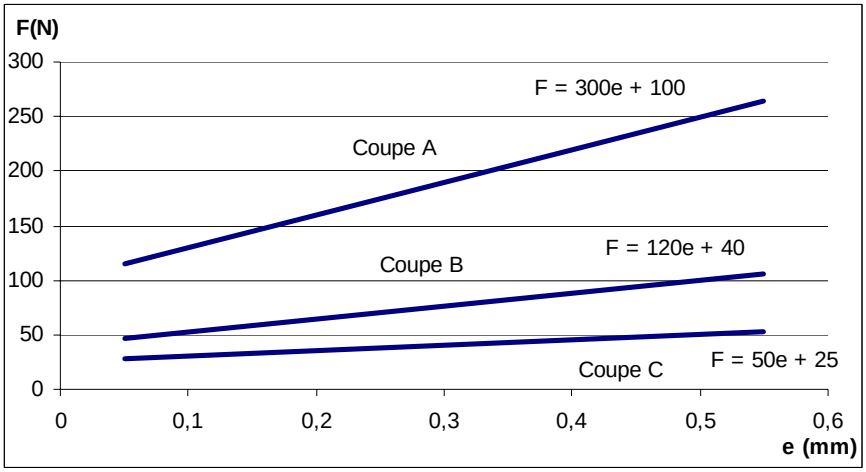


Figure 63 : Force nécessaire à la coupe (largeur : 1cm) en fonction de l'épaisseur du copeau suivant les directions de coupe (hêtre à 12% et γ=30°) [MARTIN;38]

L'épaisseur de copeau influence également un grand nombre de grandeurs de coupe : la puissance nécessaire pour effectuer la coupe dépend de l'angle de coupe et augmente linéairement avec Em (ainsi que de nombreux autres paramètres). Les efforts reçus par une dent de l'outil augmentent également avec Em, cela conditionne donc l'usure des arêtes de coupe. La courbe du travail spécifique (énergie nécessaire pour transformer 1 cm^3 de bois en copeaux) en fonction de Em nous renseigne sur la zone entre laquelle la consommation d'énergie est la plus faible [DUONG,54] (Figure 64). Cette zone est, bien évidement, dépendante des conditions de coupe dans lesquelles les copeaux sont réalisés.

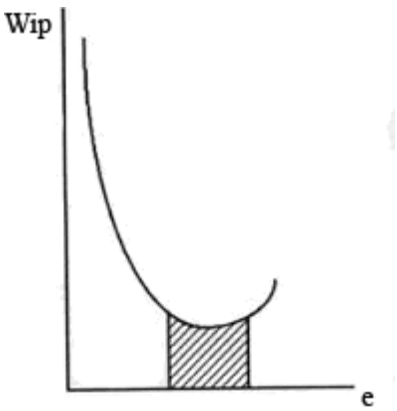


Figure 64 : Courbe du travail spécifique en fonction de l'épaisseur moyenne de copeaux

Voyons maintenant les facteurs liés à la conception de l'outil de coupe et influant sur les efforts de celui-ci lors de l'usinage.

3.1.9 Paramètres d'usinage : facteurs liés à l'outillage

Le système d'outillage est un ensemble complexe où de multiples parties de celui-ci sont susceptibles d'influencer l'usinage d'une pièce de bois. Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons aux parties actives du système en mettant de coté tous les problèmes liés à la machine, à la fixation de l'outil, l'usure des outils et bien d'autres.

3.1.9.1 La répartition des angles de coupe

La répartition des angles de coupe ou géométrie de coupe joue le plus grand rôle lors de la formation du copeau (paragraphe 3.1.3). L'angle de coupe en particulier conditionne la pénétration de l'arête de coupe dans la matière. C'est également lui qui donnera la direction de l'effort de coupe principal.

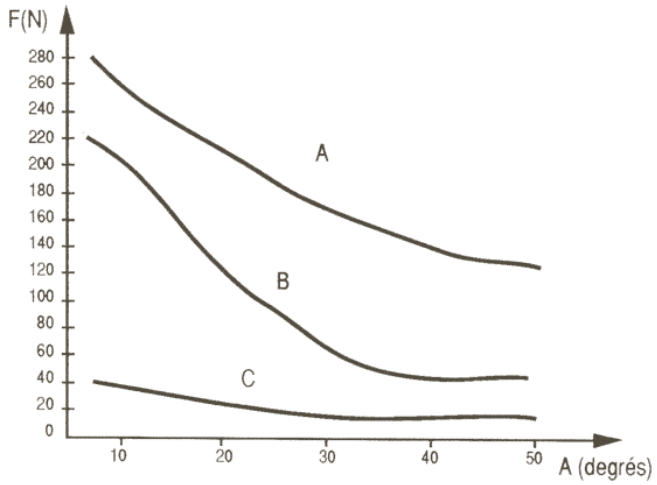


Figure 65 : Influence de l'angle de coupe γ suivant les modes de coupe A, B et C (cas du hêtre à 12% d'humidité, copeau de 0.2mm, outil usé à 50%)

Comme l'explique P. MARTIN [38], la Figure 65 indique l'influence de l'angle de coupe sur les efforts suivant les modes de coupe. Dans la pratique de l'usinage du bois, la trop forte augmentation de l'angle de coupe peut provoquer une fragilisation de l'arête de coupe et donc des risques de cassure. De plus, un angle de coupe important favorise le copeau de type I ainsi qu'un mauvais état de surface dû aux éclatements de la formation du copeau. Dans le cas de l'élagage des haies de bords de route, nous favoriserons la formation de gros copeaux et chercherons à diminuer les efforts de coupe avec le choix d'un angle de coupe important.

3.1.9.2 La disposition des outils en hélicoïde

Les porte-outils opérant par coupe périphérique hélicoïdale présentent une géométrie dans laquelle les couteaux sont placés selon une inclinaison par rapport à l'axe de rotation, en formant plusieurs rangées

obliques pouvant posséder une arête tranchante continue. L'inclinaison de ces rangées par rapport à l'axe de rotation du porte-outil hélicoïdal est nommée « angle d'hélice ». La Figure 66 montre un modèle de ce type de porte-outil.

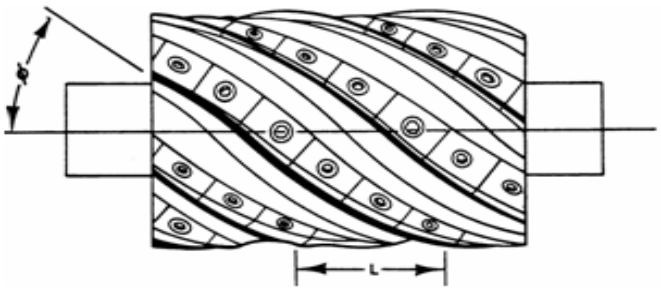


Figure 66 : Porte outil hélicoidal type outil de raboteuse avec Φ l'angle d'hélice [STEWART 55]

Les porte-outils hélicoïdaux réalisent la coupe de façon progressive: seulement quelques points du cylindre de coupe touchent la pièce à chaque instant. Cette action de coupe minimise l'impact lors de l'usinage (donc les efforts de coupe) tout en réduisant le niveau de bruit généré. Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce sujet : STEWART [55], BEROLZHEIMER, JONES [56]. Lors de la coupe hélicoïdale et à usinage constant, la répartition temporelle des efforts de coupe s'effectue de façon différente (Figure 67). Dans le cas d'un porte-outil droit traditionnel, le passage de chaque dent signifie un effort de coupe alors que pour l'outil hélicoïdal, la coupe s'effectue de façon plus continue.

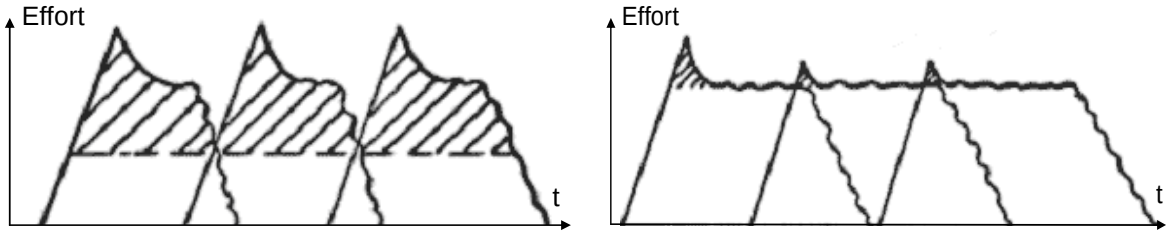


Figure 67 : A gauche, effort de coupe pour un outil droit, à droite pour un outil hélicoïdal [STEWART ;55]

A titre d'information, les portes outils hélicoïdaux possèdent néanmoins certains inconvénients :

- Coût plus élevé des couteaux et des porte-outils.
- Affûtage plus compliqué et coûteux.
- Augmentation du temps d'installation des couteaux.
- Nécessité d'aligner la machine de façon à compenser la poussée latérale, pour éviter une friction excessive lors de l'alimentation.

Il existe des systèmes reprenant les avantages de la disposition des couteaux en hélice tout en réduisant les coûts des couteaux et de leur affûtage.

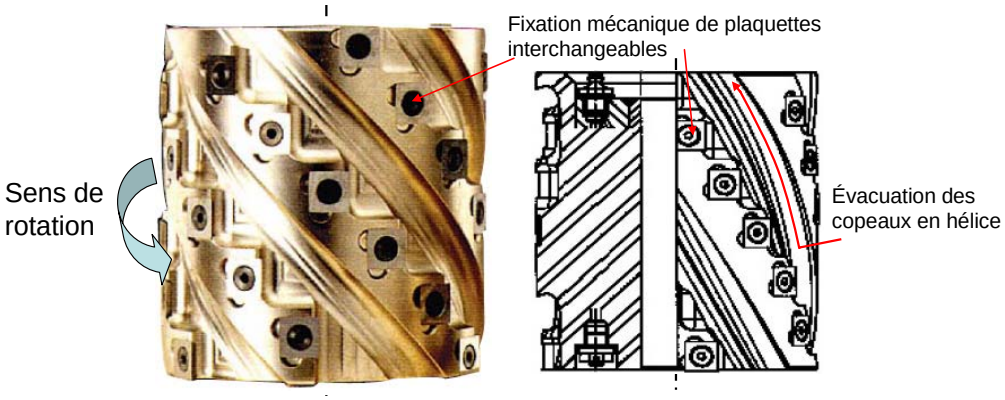


Figure 68 : Outil de rabotage hélicoïdal à plaquettes (GUILLEN Outils Techniques)

Certaines généralités sur l'usinage traditionnel du bois permettent de mieux comprendre et de mieux appréhender la transformation de ce matériau si particulier. De nombreux paramètres influencent cette transformation et nous retrouvons une partie de ceux-ci dans l'élagage des haies de bords de route. Nous pouvons étudier désormais, à la lumière de ce qui a été dit précédemment, les différentes machines productrices de plaquettes de chauffage.

3.2 Les outils producteurs des plaquettes de chauffage

Les machines industrielles produisant des plaquettes de chauffage ne sont pas très nombreuses et les technologies dépendent davantage de critères comme le coût, la mobilité, la production etc. que de la façon de produire les plaquettes. En effet, la plupart de ces machines possèdent un système de coupe particulier, des organes de transmission les plus simples possibles et surtout une source d'énergie surdimensionnée pour faire fonctionner le tout. Cette tendance est en cours d'évolution puisqu' aujourd'hui, plus qu'avant encore, l'heure est à l'économie d'énergie et l'on se penche de plus en plus sur la façon de couper plutôt que sur la puissance du moteur. Ce chapitre est donc dédié à l'étude des systèmes de coupe permettant la fabrication de plaquettes de chauffage. L'étude, plus globale, de l'intégralité des systèmes de broyage, puissances installées, alimentation et évacuation des produits etc. est détaillée en annexes (annexe 2.3).

3.2.1 Les broyeurs forestiers

Les plaquettes pour le bois énergie peuvent être fabriquées par déchiquetage de morceaux de bois (billons, branches…) provenant de la forêt. L'opération de déchiquetage consiste à découper les plaquettes de bois et de les calibrer en partant des produits issus de l'abattage et du façonnage, cette opération est souvent réalisée sur le chantier forestier ou proche de celui-ci. Un synoptique détaillé de cette filière est situé en annexes (annexe 2.2).

Les déchiqueteuses (ou broyeurs) sont des machines possédant des outils en rotation qui fragmentent le bois. Un broyeur est caractérisé par plusieurs éléments constitutifs:

- Son outil de coupe (disque, tambour ou autres…)
- L'alimentation en bois
- Sa capacité de broyage
- Sa capacité de production/sa puissance

L'entreprise NOREMAT est également revendeur de matériels de broyage forestiers servant la plupart du temps à réduire le volume des branches issues de l'élagage des haies de bords de routes. Ils proposent toute une gamme allant du plus petit broyeur à disque alimenté par la prise de force du tracteur au plus gros broyeur à tambour avec moteur indépendant.

3.2.1.1 Le broyeur à disque

Le broyeur à disque comporte plusieurs couteaux disposés radialement et des orifices munis de "peignes" ou "éclateurs". Lors du passage d'un couteau au niveau de la branche à déchiqueter, une tranche est sectionnée sous l'effort de cisaillement entre le couteau et le contre couteau, elle traverse l'orifice en se fractionnant sur les éclateurs et ensuite est éjectée dans la goulotte de la machine. Les copeaux sont éjectés par force centrifuge et par le courant d'air produit par la rotation des pales fixées à l'arrière du disque. Ce dispositif se retrouve en général sur les machines de petites et de moyennes capacités (Figure 69) [LAURIER,57].

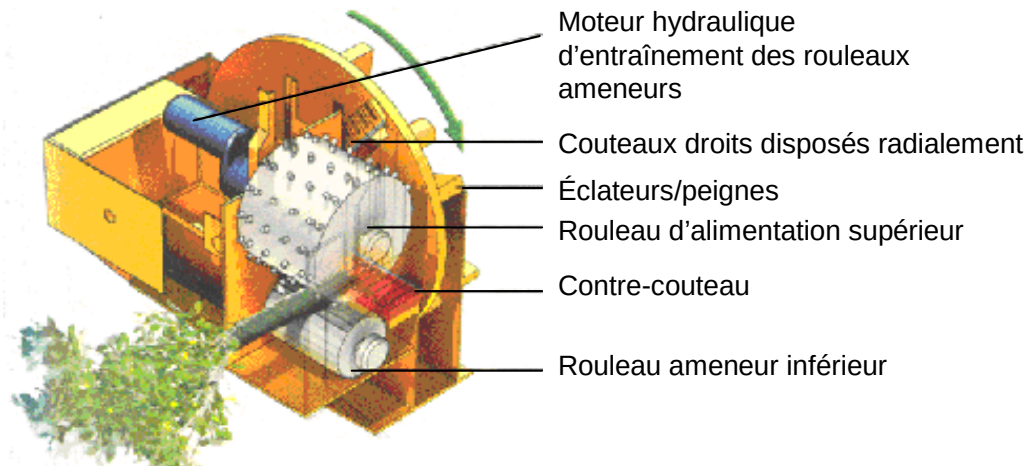


Figure 69 : Principe de fonctionnement d'un broyeur à disque (NOREMAT)

Ce sont les conditions de coupe qui déterminent la calibration des plaquettes : vitesse d'avance des rouleaux ameneurs, saillie des couteaux par rapport au disque, vitesse de rotation du disque, régulation de cette vitesse. Actuellement, Rami ABDALLAH, étudiant en thèse au LERMAB, effectue des

recherches sur ces systèmes de coupe. Il a mis en évidence les paramètres intervenant lors de la formation de la plaquette en déchiquetage du bois [58].

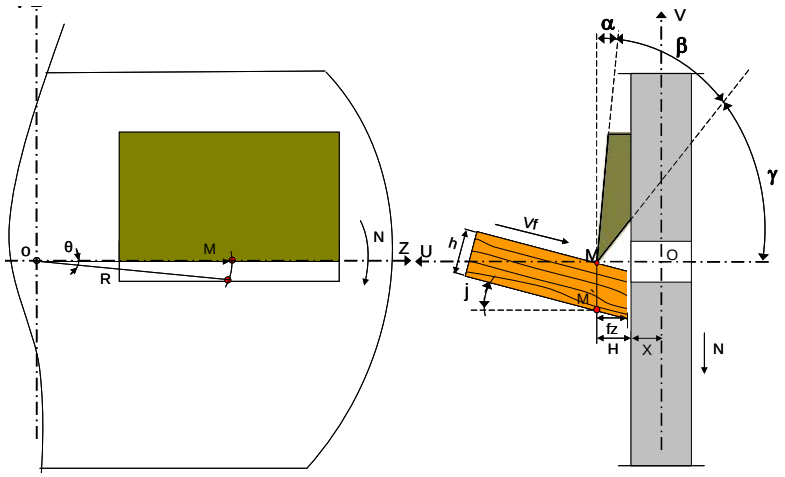


Figure 70 : Récapitulation des paramètres de coupe influant sur la formation des plaquettes en déchiquetage par broyeurs à disques.

Sur la Figure 70, nous retrouvons les angles de coupe α, β et γ, la vitesse d'avance du bois Vf, l'avance par dent fz (avance du bois entre chaque passage de dent, paramètre dépendant de Vf et de la vitesse de coupe Vc). Pour le déchiquetage, le mode de coupe est le 90-90 et l'on ne peut pas vraiment parler de travail en opposition ou en avalant étant donné que le bois avance perpendiculairement au plan de coupe.

3.2.1.2 Le broyeur à tambour

Le broyeur à tambour est un cylindre muni de couteaux, ou séries de couteaux, qui sont fixés sur toute la largeur du tambour (ou rotor). Le diamètre du tambour est inférieur à celui d'un disque porte-couteaux, à capacité identique. La granulométrie désirée correspond au maillage d'une grille qui joue en quelque sorte le rôle de tamis et d'éclateur (Figure 71) : les copeaux restent soumis à l'action du rotor tant qu'ils ne peuvent pas traverser cette grille, on limite ainsi les queues de déchiquetage. Selon les fabricants, on trouve des grilles de tailles et de formes différentes.

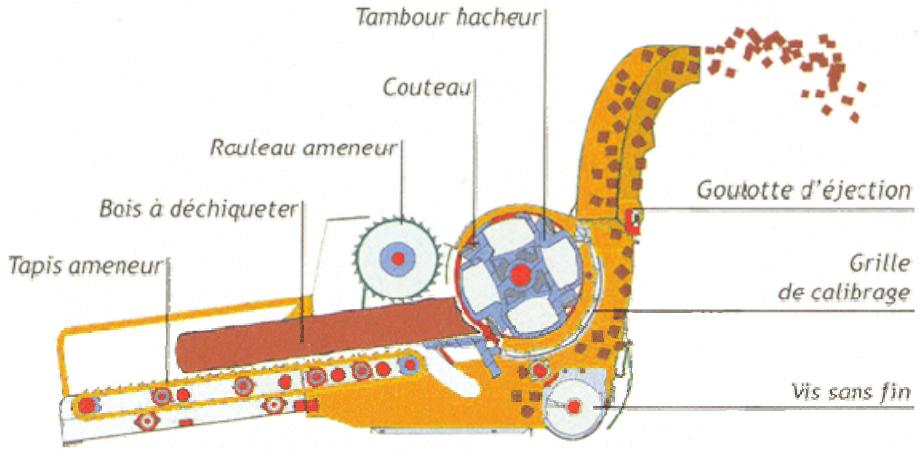


Figure 71 : Principe de fonctionnement d'un broyeur à tambour (NOREMAT)

Toujours suivant les travaux de Rami ABDALLAH, l'usinage des broyeurs à tambour est plutôt en avalant. La Figure 72 nous montre également les grandeurs de coupe pour le broyeur à tambour : on retrouve l'avance par dent fz, la vitesse d'avance Vf et les angles de coupe sont les mêmes que pour le broyeur à disque.

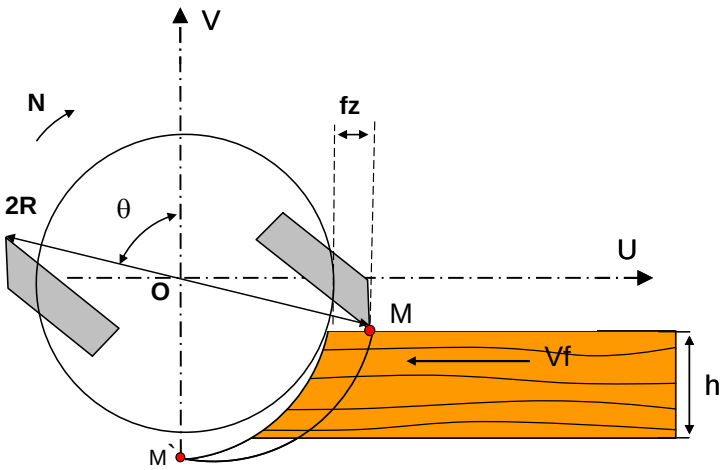


Figure 72 : Récapitulatif des paramètres de coupe influant sur la formation des plaquettes en déchiquetage par broyeurs à tambour

Les auteurs [57] ne sont toujours pas en accord sur la meilleure technologie à adopter pour fabriquer de la plaquette de chauffage de qualité. Le broyeur à disque est souvent moins cher à l'achat que le tambour à capacité de production équivalente. Par contre, les coûts de production des deux sont difficiles à estimer. En ce qui concerne la granulométrie, la présence de grille de calibrage et l'inertie plus importante du tambour défavorisent souvent le broyeur à disque. A l'achat le choix se portera le critère du prix et de la productivité.

3.2.1.3 Analyse du broyage

Selon BUCHAN et DUCHNICKI [59], les plaquettes se forment selon deux mécanismes différents, le fendage et le tranchage. Le tranchage est l'action de l'arête de coupe sur la matière et le fendage est la séparation des particules entre elles par l'énergie du couteau dissipée dans la matière. Le pourcentage des plaquettes produites par le fendage est plus grand que celui produite par le tranchage. Et selon UHMMEIER [60], qui a analysé par vidéo l'opération de formation des plaquettes, une zone de bois compressée se forme devant l'arête de coupe, cette zone se déplaçant devant le couteau pénétrant dans le bois. Alors des fissures se forment selon deux cas : soit la cohésion du bois est bonne et c'est l'énergie du couteau qui propage la fissure (tranchage), soit la cohésion du bois est plus mauvaise et c'est l'énergie d'élasticité du bois qui propage la fissure (fendage). Le terme de fendage désigne alors la séparation des plaquettes entre elles par l'action combinée d'une séparation des fibres suivant un plan parallèle aux fibres et un cisaillement parallèle au fibres. Dans le premier cas, ce sont les conditions seules de coupe qui déterminent la forme et l'état de surface de la plaquette et dans le deuxième cas, ce sont les conditions de coupe additionnées des propriétés physiques du bois : résistance mécanique, cohésion des fibres, humidité…

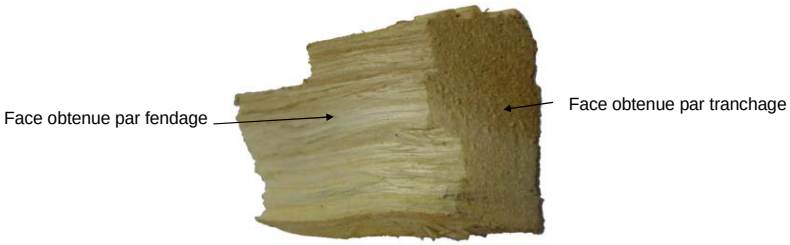


Figure 73 : état de surface d'une plaquette d'acacia obtenue par déchiquetage à disque

Pour le broyage à tambour, le mode de coupe utilisé est le travail en avalant et la formation des copeaux est décrite Figure 74. Tout comme le mode de coupe en opposition décrit précédemment, on distingue plusieurs phases de formation du copeau : cette fois-ci, le copeau commence par être plus épais et se termine de façon plus fine. L'orientation du fil du bois limite la propagation de fissure et ainsi favorise la création de copeaux de type II selon GOLI [61].

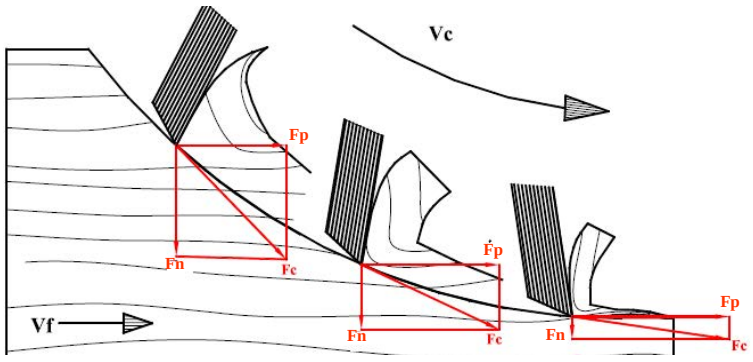


Figure 74 : Formation du copeau en coupe rotative et travail en avalant

Lors de la formation de copeaux et à plus forte raison de plaquettes de chauffage, les phénomènes de propagation de fissures interviennent très largement. Selon McKenzie [41], l'arête tranchante contraint les fibres jusqu'à rupture de ces dernières. Il a identifié cinq zones dans lesquelles les fissures peuvent apparaître (Figure 75). Ces fissures sont dues aux contraintes de cisaillement en direction du fil, aux contraintes de traction perpendiculaires au fil et à la flexion des fibres autour de l'arête de coupe.

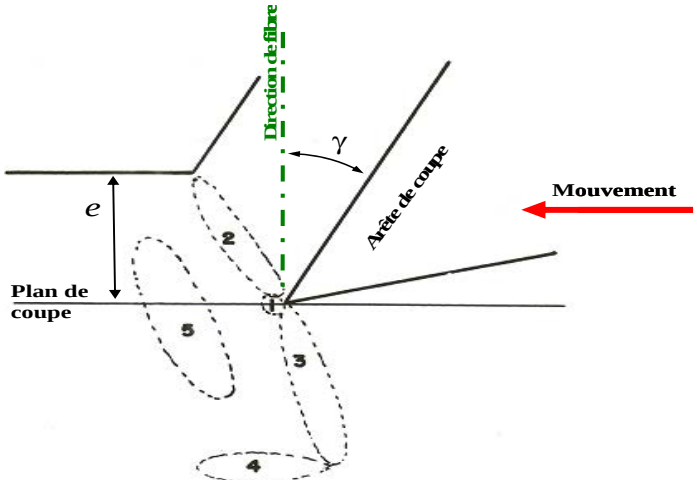


Figure 75: Les zones de rupture potentielle en mode de coupe A.

En distinguant le bois possédant une bonne cohésion de fibres d'un bois possédant une mauvaise cohésion de fibres, le détachage de la plaquette se déroule différemment. Pour la bonne cohésion, des fissures apparaissent au passage du couteau mais n'influencent pas la formation de la plaquette et peuvent même disparaître. Dans le cas contraire, les fissures ne se créent pas dans le plan de coupe mais il y a formation d'un deuxième plan de rupture.

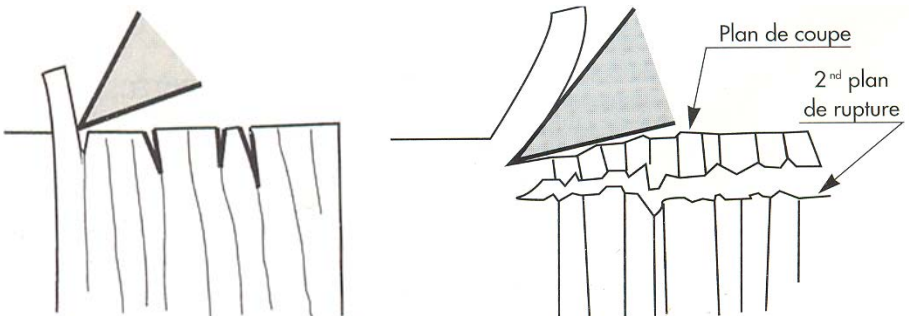


Figure 76 : propagation des fissures lors du passage de l'outil avec, à gauche un bois de bonne cohésion et, à droite, un bois de plus mauvaise cohésion.

Comme nous l'avons vu, l'opération de broyage se rapproche vraiment de l'usinage traditionnel du bois et tout comme celui-ci, de multiples paramètres peuvent intervenir et influer sur la taille et la forme des plaquettes. On retrouve donc les questions de vitesse de coupe, d'avance, d'angles de coupe, etc.

3.2.2 Le canter de scierie

Contrairement aux broyeurs forestiers, le canter est une machine fixe, généralement présente dans les scieries et intervenant directement dans le cadre de la production de celle-ci. Le principe du canter de scierie est de directement transformer les chutes de sciages en plaquettes de chauffage ou de trituration. De cette manière, la productivité est améliorée et l'on simplifie le problème de l'évacuation des chutes de sciages. Deux technologies sont principalement utilisées pour réduire les dosses et les délignures : l'une s'occupant plus des parties restantes après les premiers sciages (la profileuse de chant) et l'autre, souvent plus grosse, assurant le surfaçage complet d'un coté du billon (Figure 77).

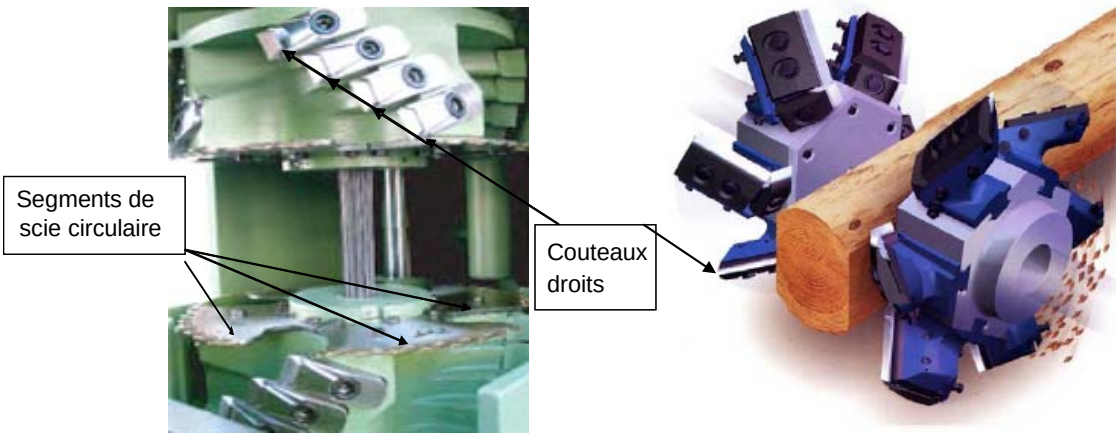


Figure 77 : A gauche le canter profileuse de chant et à droite le canter latéral

Le canter latéral est la technologie la plus développée du fait de l'étendue de ses applications. Les couteaux sont montés sur la partie conique et l'ensemble est mis en rotation. Pour la profileuse de chant, elle représente un disque (une fraise) doté de couteaux droits régulièrement distribués sur la périphérie. Ce sont généralement des outils plus petits en diamètre mais pouvant tourner plus vite : si l'on prend le constructeur LINCK, celui-ci propose des outils de 400mm de diamètre de coupe et pouvant tourner jusqu'à 2000tr/min, vitesse de périphérique de coupe : 42 m/s.

Plusieurs recherches ont été suivies sur ce mode de coupe et de nombreuses conclusions ont été formulées. La littérature sur les canter/slabber est plus riche car le matériau coupé est plus régulier (billon d'essences constantes relativement droit) et les séries sont plus longues que pour les broyeurs forestiers. Les auteurs expliquent que le paramètre ayant le plus influence sur la taille des plaquettes est l'avance par dent c'est-à-dire la distance qu'a parcourue le billon entre deux passages de dents. C'est le passage de dent par tranchage suivi d'un fractionnement du copeau (fendage) qui produit les plaquettes (Figure 78). En effet, l'analyse du rapport entre la longueur (dans ce cas, équivalent à l'avance par dent) et l'épaisseur des plaquettes montre [TWADDLE ;62] que les deux augmentent en même temps.

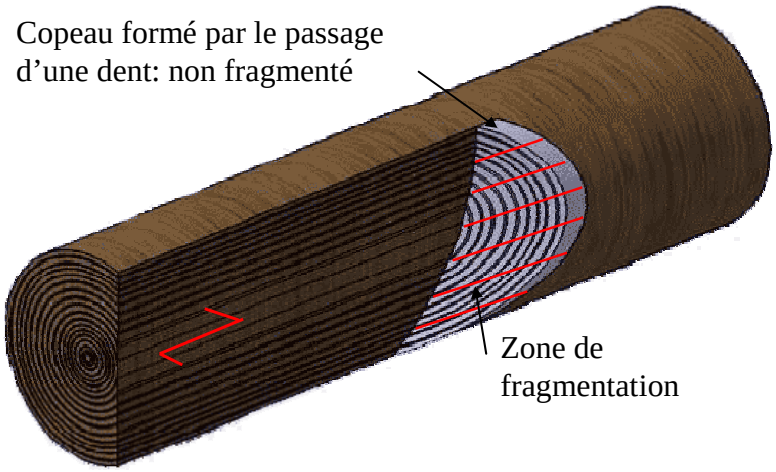


Figure 78 : Copeau non fragmenté retiré par une dent de slabber (à couteaux hachoirs) [HOUZIAUX ;63]

Selon les mêmes travaux, l'orientation des fibres influence également l'épaisseur des plaquettes : une coupe 90-90 donnera une épaisseur plus faible qu'une coupe en 0-90 et d'une façon générale l'épaisseur diminue lorsque l'on va d'une coupe tangentielle vers une coupe radiale.

La vitesse de coupe (à avance par dent constante) lorsqu'elle augmente, entraîne [HERNANDEZ ;64] une diminution de l'épaisseur des plaquettes d'environ 15% pour une variation de 50% de la vitesse.

L'augmentation de l'humidité relative jusqu'au point de saturation de fibres entraîne une augmentation de l'épaisseur des plaquettes, mais, en même temps une plus grande régularité dans les variations de l'effort de coupe [BUCHANAN;59]. UHMEIER [65] montre que l'angle de bec est lié à l'avance par dent pour déterminer l'influence sur l'épaisseur des plaquettes. En effet, à faible longueur, une augmentation de l'angle de bec entraîne une diminution de l'épaisseur.

3.3 Conclusion du chapitre

Le présent chapitre a permis de se convaincre d'une chose particulière importante pour la suite de la recherche : la formation de plaquettes de chauffage est régi par les mêmes lois que pour les copeaux classiques de l'usinage du bois. Ceci implique donc qu'il faille maîtriser les mêmes paramètres de coupe que lors de l'usinage (Figure 59).

Il y a néanmoins un facteur qui ressort plus dans le broyage que dans l'usinage et qui donne une composante aléatoire à l'effort de coupe : le fendage. Ce phénomène, dépendant de la nature même du bois coupé, entre de façon importante dans la fabrication des plaquettes.

Le présent chapitre a permis de mieux se familiariser avec les paramètres pour la formation des plaquettes et plusieurs choses ont été identifiées :

- Le type de copeau : il faudra favoriser le type I pour diminuer l'effort de coupe et augmenter la taille des plaquettes,
- Les essences sont variables dans les haies mais l'humidité y est toujours important : cela diminuera les efforts de coupe et favorisera la formation des plaquettes.
- L'état de surface est moins contraignant que la taille des plaquettes : la maîtrise des différents paramètres de coupe et d'outillage sera déterminante.
- Les modes de coupe font varier de façon significative l'effort de coupe : nous devons donc essayer de limiter le mode de coupe A, trop consommateur en énergie.
- L'outil de conception hélicoïdale possède de nombreux avantages et est régulièrement utilisé lors de la conception de canters. Il permet, entre autre, une meilleure répartition dans le temps des efforts d'usinage.

Chapitre 4. CONCEPTION ET PRESENTATION DU NOUVEAU SYSTEME DE COUPE

Les chapitres précédents ont mis en lumière certains préliminaires nécessaires à la conception du futur outil de coupe. Il est désormais établi qu'il devra couper un matériau souple qui est la branche, devra former des produits de valorisation de la biomasse que sont les plaquettes, le tout en respectant le cahier des charges de l'entreprise NOREMAT. Ce chapitre traitera donc de la méthodologie utilisée pour la découverte du futur système de coupe, puis présentera le dit système de coupe, puis reviendra sur les tenants et aboutissants de ce système d'un point de vue usinage. Dans ce chapitre et pour les suivants, on emploiera le terme de « éco-élagueur » pour désigner le futur système de coupe.

4.1 Méthodologies d'innovations

Le projet mis en place entre l'entreprise NOREMAT et le laboratoire LERMAB, consiste en l'élaboration et la création d'une machine nouvelle, innovante. Dans le cadre de ce projet, il est nécessaire de suivre une démarche de conception correctement paramétrée afin de respecter les différentes étapes de conception. Ces méthodologies sont inspirées d'une démarche méthodologique conçue pour maîtriser la conception des systèmes et produits complexes : l'Ingénierie Système (IS). Les pratiques de cette démarche sont aujourd'hui répertoriées dans des normes [66, 67, 68]. Les normes d'IS décrivent les pratiques du métier à travers des processus et des activités invariants suivant les domaines d'applications de l' IS. Les méthodes d'IS fournissent des démarches techniques pour réaliser ces activités.

4.1.1 Principe d'innovation et positionnement

NADEAU et al. [69] expliquent que, en terme de produits industriels, l'innovation implique deux visions :

- Etre capable de créer des produits nouveaux. Ces produits doivent comporter des fonctions nouvelles attendues ou non par le client final, leur utilisation doit être intuitive, les meilleurs produits sont autonomes c'est-à-dire qu'ils utilisent leurs ressources propres ou celles de leur environnement,
- Etre en adéquation avec un marché, c'est-à-dire que dès la gestation du produit, le marché est identifié et le temps de retour sur investissement est défini.

L'innovation passe donc automatiquement par l'étude des contraintes, le produit innovant est celui qui est vendu puis utilisé et non celui qui est créé. Pour maîtriser ces contraintes, les outils sont connus, ils gravitent tous autour de l'analyse fonctionnelle. Il existe plusieurs démarches de créativité qui ont été classées par JAOUI [70], voici les principales :

- L'analyse combinatoire consiste à décortiquer le futur produit en blocs fonctionnels organisés hiérarchiquement. Il n'y a pas de limite dans la décomposition en blocs

fonctionnels (principe des fractales), ni dans le regroupement de ceux-ci en familles. Avec cette méthode, l'analyse fonctionnelle en incontournable.

- L'analyse associative vient du principe que les associations d'idées ne sont pas le fruit du hasard et se base sur des outils comme le brainstorming pour produire un maximum de concept.
- L'analyse analogique qui consiste à observer son environnement et à être capable de faire un lien avec une utilisation industrielle ou la satisfaction d'un besoin. (ex : l'évolution des combinaisons de nage sportive et la peau de requins. L'idée va germer lors qu'on peut définir une similarité de fonctions, de formes, de caractéristiques ou d'association de ces visions.

La démarche innovante qui a permis la découverte du concept de coupe pour le futur outil est une combinaison de ces trois démarches de créativité mais à des dosages différents. Le concept de coupe principal (outil de laboratoire) provient d'une analyse analogique avec les outils de l'industrie traditionnelle du bois. Les améliorations lors du passage au prototype industriel proviennent d'une démarche plus combinatoire (amélioration par décomposition en blocs fonctionnels). L'analyse associative a été abordée sous la forme de brainstormings.

4.1.2 L'innovation dans les entreprises et à NOREMAT

L'innovation est primordiale au sein de toute entreprise : l'innovation fait avancer, fait progresser, permet d'adapter l'entreprise aux nouveaux processus, usages et besoins dans le but de la pérenniser. La signification du mot « innovation » peut être précisée avec l'ajout d'un autre terme : Innovation de process (amélioration des méthodes), innovation de rupture (le produit change complètement de concept). Dans notre cas, l'éco-élagueur ne sera pas une machine qui changera le concept d'entretien des arbres par élagage. On parle donc d'innovation incrémentale : l'innovation incrémentale ne bouleverse pas les conditions d'usage et l'état de la technique, mais y apporte une amélioration sensible. Elle est souvent le fruit de la volonté de l'entreprise de conserver son avance technologique sur ses concurrentes.

L'entreprise NOREMAT met un point d'honneur à améliorer de façon continue les machines qu'elle propose à ses clients. A aucun moment, il n'est question de se dire que les machines d'entretien de bords de route ne nécessitent plus d'amélioration. Cette innovation passe par deux voies principales :

- La première solution est le développement des machines de conception et fabrication interne à l'entreprise. Cette voie d'amélioration passe par des ressources classiques comme un bureau d'étude, un bureau technique et l'écoute des demandes clients. Cette amélioration passe également par la création, en parallèle de l'entreprise, par une autre société ACTIBAC qui est chargée de développer certains concepts.

- La seconde solution est le partenariat de l'entreprise NOREMAT avec plusieurs constructeurs de machines d'entretien, français et étrangers, dans le but de proposer régulièrement des produits nouveaux complémentaires des bras hydrauliques. Ainsi l'entreprise NOREMAT a su s'allier avec un fabriquant de broyeurs à disque VANDAELE, de broyeurs à tambour JENZ, de porteur UNIMOG MERCEDES…

Toutes ces innovations, l'entreprise NOREMAT souhaite naturellement les protéger et, de ce fait, détient actuellement une vingtaine de brevets et une quarantaine de marques. L'éco-élagueur fait actuellement l'objet d'un dépôt de brevet.

4.1.3 Méthodologie retenue

Après avoir examiné avec attention les multiples outils et méthodes pour la conception et l'élaboration de produits (paragraphe 4.1.1), nous avons décidé d'orienter notre démarche vers la « méthode APTE » (APplication aux Techniques d'Entreprise). Reposant sur des outils graphiques tels que « la bête à cornes » ou « le diagramme pieuvre », la méthode APTE est une méthode universelle et incontournable pour la conduite d'un projet passant par une innovation analogique. En partant de l'expression d'un besoin ressenti et sans considérer à priori les solutions, elle permet d'évaluer l'ensemble des contraintes (techniques, économiques, culturelles...) qui affectent le projet. C'est une sorte de brainstorming organisé qui permet d'aboutir au cahier des charges fonctionnel. La démarche peut être schématisée de la façon suivante (Figure 79) :

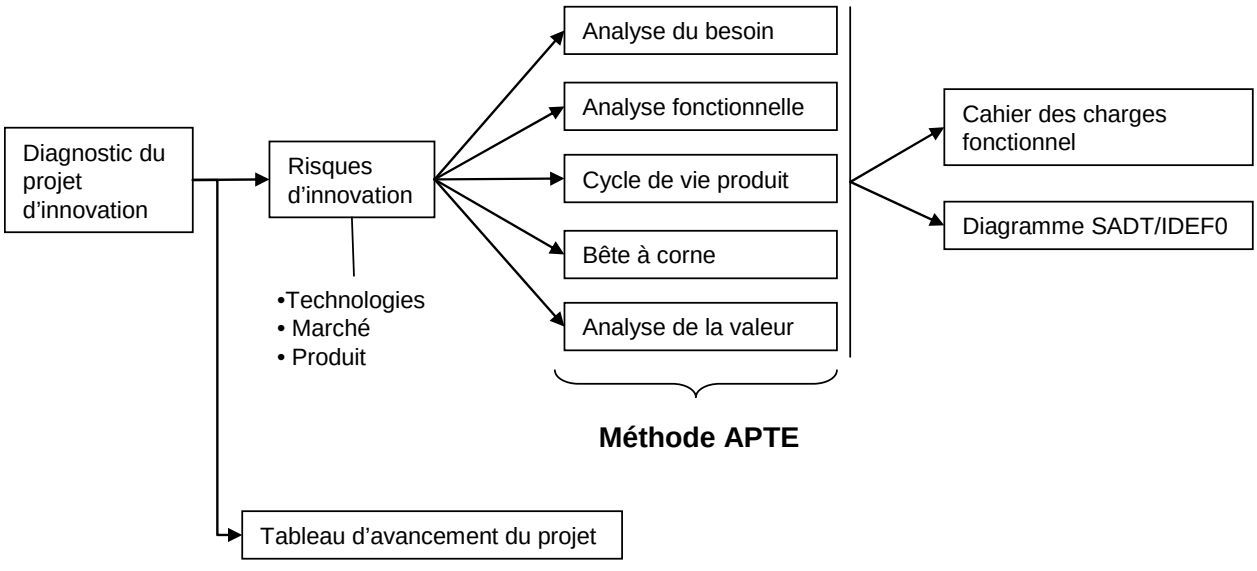


Figure 79 : Démarche choisie pour la conception de l'ECO-ELAGUEUR

Deux outils seront utilisés en amont du projet : le « Diagnostic du projet d'innovation » qui permet la préparation d'un projet avant même son lancement. Une estimation des « Risques d'innovation » sera

effectuée. De plus, et comme pour chaque projet, il sera nécessaire de tenir à jour un « Tableau d'avancement du projet ».

4.1.4 Diagnostic du projet d'innovation

Ce diagnostic est un outil de conseil élaboré pour analyser un projet d'innovation avant son lancement [NEAU ;71]. Dans notre cas, l'utilisation de cet outil est quelque peu spécifique : il ne nous permettra pas de vérifier la capacité qu'a ou non l'entreprise à mener à bien ce projet, mais plutôt à mieux cerner le projet et les moyens de le mener à bien au sein de l'entreprise. En effet nous ne nous sommes pas attardés sur les compétences et la capacité de mise en œuvre de l'entreprise à mener ce genre de projet. Nous avons préféré analyser les tenants et aboutissants du projet en lui-même.

La méthode consiste tout d'abord en l'analyse du projet en lui-même (paragraphe 4.1.5), puis en l'étude des capacités de l'entreprise (paragraphes 4.1.6 et 4.1.7). Vient ensuite l'étude du projet en lui-même avec ces risques (paragraphe 4.1.8) et son cahier des charges (paragraphe 4.2).

4.1.5 Analyse des pré-requis

Les enjeux sont importants, il s'agit de concevoir une machine nouvelle dans la gamme NOREMAT. Cette machine doit assurer une part importante dans l'entretien des haies de bord de route. La réussite de ce projet permettrait à l'entreprise NOREMAT de proposer la solution de traitement des haies que ses clients attendent.

La force de l'activité de base de l'entreprise NOREMAT est sa capacité à innover pour répondre au besoin de ses clients. Ce projet s'inscrit donc dans cette volonté là. La disponibilité pour mener à bien ce projet est la suivante : mise à disposition à plein temps d'un ingénieur de recherche sur une période de trois ans dont la mission est la gestion et la finalisation du projet.

Celui-ci dispose d'une étude de marché à travers l'écoute des clients de l'entreprise qui attendent ce type de solution pour entretenir les haies. A l'heure actuelle, les concurrents de l'entreprise NOREMAT sont d'ors et déjà dans des perspectives de développements similaires.

4.1.6 Le degré de préparation et connaissance de l'entreprise

Si nous devions identifier le projet : il peut se définir par une élaboration et la conception d'un groupe d'entretien de haie de bord de route. Il s'agit donc d'un thème d'innovation plutôt large. L'entreprise possède une certaine expérience en maîtrise de la gestion de projet au travers d'années d'innovation dans son domaine d'activité. Je suis chargé de mener à bien ce projet avec les compétences et la méthode des enseignements de l'ENSTIB. L'entreprise NOREMAT ainsi que le LERMAB sont familiarisés aux projets innovants. En ce qui concerne l'adaptabilité et les compétences de conception, l'entreprise possède des services compétents pour adapter le produit aux machines, l'industrialisation

de celui-ci… De plus, les problématiques comme l'étude de la concurrence ainsi que la place du client sont des sujets maîtrisés par l'entreprise. L'essence même de ce projet est le partenariat entre le LERMAB et NOREMAT.

4.1.7 Les compétences et la capacité de mise en œuvre du projet

La méthodologie complète du diagnostic d'un projet d'innovation impose l'analyse complète des moyens et compétences de l'entreprise. Les points suivants sont à aborder : Production, assemblage, services, ressources humaines, financement, maîtrise et système d'information, maîtrise de la technologie, organisation, marketing et commercial, protection juridique, brevet, patrimoine. Malheureusement cela représente une somme de travail trop importante, c'est pourquoi nous avons décidé de nous en tenir à l'analyse du projet en lui-même.

4.1.8 Analyse des Risques d'innovation

L'analyse des risques d'innovation permet de situer un projet sur une « échelle de risque ». Selon la méthode, trois échelles sont utilisées pour quantifier l'innovation d'un produit nouveau : le marché, la technologie et le produit. De là, sont définies trois zones de risques pour le produit innovant [NEAU ;72]. L'ECO-ELAGUEUR trouve sa place dans le schéma suivant (Figure 80). Il constitue une réelle avancée pour le produit car il apporte deux fonctions principales supplémentaires. La fonction COUPER existant déjà, les deux fonctions BROYER et TRAITER seront ajoutées. De ce fait, la nouveauté du marché est réellement présente mais elle fait face aux concurrents qui ont déjà établis des innovations dans le domaine. La nouveauté technologique existe également mais là encore les technologies utilisées sont déjà utilisées dans des domaines forestiers ou de la filière bois.

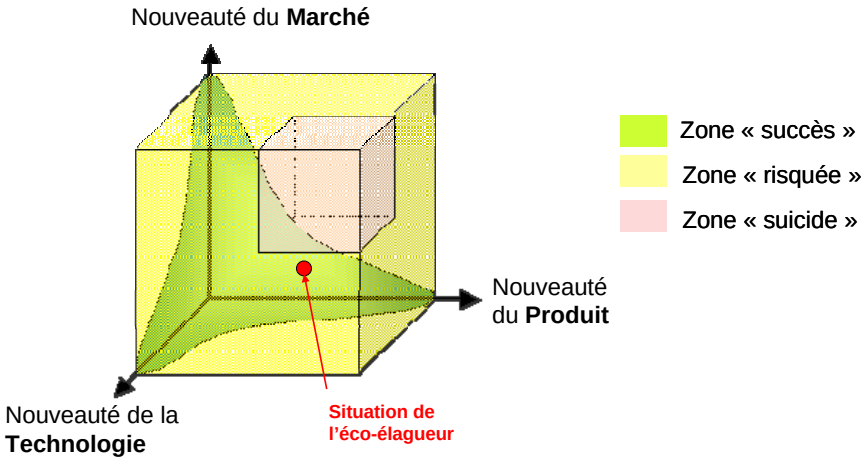


Figure 80 : Diagramme des risques d'innovation de l'éco-élagueur

Nous nous situons donc entre la zone « risquée » et « succès ».

4.2 Cahier des charges fonctionnel de l'outil

Dans le cadre de la démarche économique et écologique mise en place par NOREMAT, il a été décidé de concevoir une nouvelle machine d'élagage de bord de route. Cette machine devra avoir les fonctions principales suivantes :

- Couper les branches
- Les broyer en plaquettes
- Les stocker

4.2.1 Le produit et ses objectifs

Afin d'offrir un service supplémentaire aux clients de NOREMAT, les deux fonctions principales du produit seront réalisées et montées sur une seule machine d'élagage, de sorte que l'utilisateur effectue les deux opérations en un seul passage de tracteur.

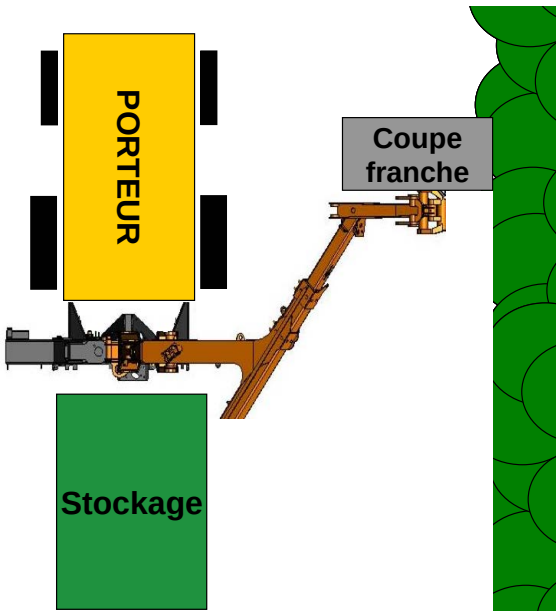


Figure 81 : Perspectives générales du produit

4.2.2 Le contexte du projet

Ce projet s'inscrit dans la démarche « éco lamier » et la volonté de NOREMAT d'avoir des machines d'élagage en relation avec les enjeux environnementaux et économiques actuels.

4.2.2.1 Date et mise en service

La date de mise en service du produit « éco-élagueur » est proche de celle de la fin de mon étude… Le contrat de thèse se terminant en mars 2009, le concept de coupe et le prototype industriel sont donc développés à ce jour.

4.2.2.2 Les intervenants

Les intervenants du projet au sein de NOREMAT sont les suivants :

- Maîtrise d'ouvrage : C.BACHMANN
- Maîtrise d'œuvre : A.ROUGIE

Le projet sera également encadré par deux enseignants-chercheurs du LERMAB :

- Directeur de thèse : P.TRIBOULOT
- Co-encadrant de thèse : PJ. MEAUSOONE

4.2.3 Diagramme BÊTE A CORNE

La bête à cornes est un outil de représentation de trois questions fondamentales (Figure 82). C'est un des éléments de la méthode APTE. Il illustre de façon graphique les intervenants du besoin.

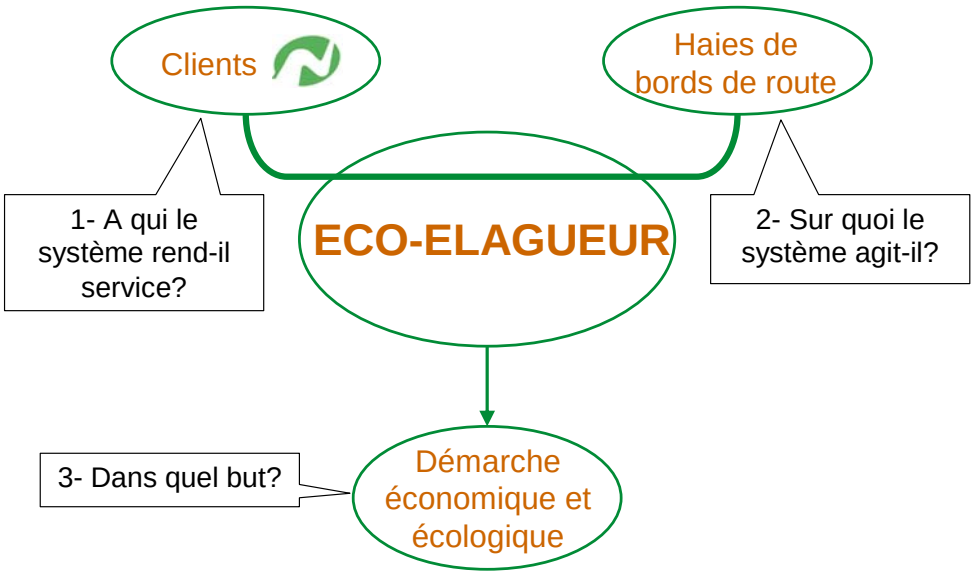

Clients
Haies de bords de route
1- A qui le système rend-il service?
ECO-ELAGUEUR
2- Sur quoi le système agit-il?
3- Dans quel but?
Démarche économique et écologique

Figure 82 : Représentation des besoins par BÊTE A CORNE

4.2.4 Description des fonctions

Les fonctions principales se déclinent de la manière suivante :

- FPCOUPER – Couper la végétation
- FPBROYER – Broyer la végétation coupée
- FPRECUP – Récupérer les déchets broyés

Les fonctions principales répondent à la question suivante : quelles sont les raisons pour lesquelles l'objet a été créé ? Pour chaque phase de sa vie il s'agit d'identifier le but de la relation que le produit crée avec son environnement.

4.2.4.1 FPCOUPER – Couper la végétation:

L'outil coupant monté sur l'éco-élagueur doit couper de façon nette et franche toutes branches qui se présenteraient à lui. L'outil doit couper sur toute sa hauteur, des branches de diamètres et de longueurs variés. Cette fonction doit être adaptable au bout d'un bras hydraulique NOREMAT.

4.2.4.2 FPBROYER – Broyer la végétation:

Une fois coupées, les branches devront être broyées et calibrées dans un broyeur afin de les transformer en plaquettes de chauffage.

Ce broyeur sera transporté sur la machine et devra donc respecter des contraintes de poids et de puissance nécessaire.

4.2.4.3 FPRECUP – Récupérer et trier les déchets:

Un système de captation et de convoyage récupérera les plaquettes calibrées afin de les acheminer vers la zone de stockage. Le système choisi limitera les pertes de puissance et de matière, évitera les bourrages. Les déchets récupérés ressemblent à un mélange de matière ligneuse et de feuillage, l'objectif est de séparer par un quelconque moyen les deux matériaux. Le système de tri stockera les déchets bois et évacuera les déchets verts en forêt. La zone de stockage sera adaptée à un déchargement soit en camion, soit en tas.

4.2.4.4 Synthèse des fonctions

L'ordre dans lequel s'effectuent les fonctions principales n'est pas primordial, à partir du moment où elles sont remplies. Les fonctions contraintes peuvent se décliner de cette manière :

- Contraintes fonctionnelles
- Contraintes techniques
- Contraintes environnementales
- Contraintes en moyens humains et techniques
- Contraintes réglementaires et légales

Les fonctions contraintes répondent à la question suivante : quelles sont les contraintes auxquelles l'objet doit satisfaire ? Pour chaque position d'utilisation, il s'agit de définir les contraintes imposées au produit par son milieu extérieur d'utilisation.

Le tableau suivant montre un récapitulatif non exhaustif des fonctions principales (FP) et des fonctions contraintes (FC) de « l'éco élagueur » :

Fonctions principales	Fonctions contraintes	Critères	Niveaux	Flexibilité
FPCOUPER: Couper la végétation	FC1: Respecter la cinématique de coupe	Hauteur de coupe	De 30cm à 10m	Minimum 1,50m
		Largeur de coupe	2m	
		Diamètre des branches	De 5mm à 10cm	
		Longueur des branches	< 1m	
		Vitesse d'avance	2 km/h	± 1 km/h
	FC2: Préserver l'aspect écologique et la sécurité des usagers de la route	Respecter l'aspect esthétique de la haie		
		Couper de manière franche		
		Respecter la sécurité de l'utilisateur		
		Autoriser la repousse naturelle de la végétation		
FPBROYER: Broyer la végétation	FC3: Calibrer les produits de broyage	Granulométrie des plaquettes produites	0.5*0.5*2cm pour 80% des plaquettes en masse	± 5%
	FC4: Respecter les contraintes économiques et logistiques	Cadence de chargement	18 m^3/h de branches*	± 5 m^3/h
		Masse limitée		
		Encombrement limité		
FPRECUP: Traiter les produits	FC5: Transporter des produits	Produits doivent rester propres	Moins de 2% de corps étrangers	± 1%
		Pas de contact avec le sol		
	FC6: Trier des produits	Limiter les pertes de bois	Inférieures à 10%	± 5%
		Eliminer les poussières	Moins de 2% de particules de granulométrie < 1*1mm	± 0.5%
	FC7: Evacuer des déchets	Débit de déchets verts	10 m^3/h**	± 2 m^3/h
		Goulotte orientable	360° en rotation De -45° à +45° en assiette	
	FC8: Tenir compte de la législation	Gabarit routier classique		
		Concept protégeable par brevet		
	FC9: Respecter les contraintes du porteur	Puissance de fonctionnement	Tracteur: 110 CV	Max: 150 CV
		Masse et encombrement en bout de bras	350 kg	Max 500 kg
	FC10: Travailler en chantier	Nombre de chauffeur	1	
		Nombre de machine	1	
		Simple de réglage		
		Durée de fonctionnement de la machine entre deux maintenance	1 semaine	1 jour min

Figure 83 : Tableau fonctionnel non exhaustif de l'éco-élagueur

* Pris pour une croissance moyenne apparente de la haie de 4m^3/km/an, un entretien de deux passes tous les 3 ans et une vitesse d'avance de 3km/h.

** En estimant qu'une branche broyée ne prend qu'un tiers de son volume apparent et peut posséder, dans le pire des cas, 75% de feuillage suivant la saison.

Le tableau fonctionnel permet une caractérisation des fonctions principales ou de contraintes :

- Critère : paramètre retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée.
- Niveau : repère dans l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction
- Flexibilité : tolérance fixée afin d'indiquer les possibilités de moduler un niveau pour un critère.

4.2.5 Environnement

L'éco-élagueur pourra être vendu à tous les clients de NOREMAT, dans leur ensemble, si leurs besoins sont de couper et broyer les déchets de bords de routes, de manière propre et économique : ils sont appelés « les utilisateurs ». Parmi les autres éléments qui entourent le produit, on retrouve le porteur, la végétation à couper, la végétation broyée, le chantier, mais aussi tous les usagers de la route pour lesquels la qualité et la sécurité du travail sont primordiales. Tout ceci est illustré par le diagramme « pieuvre » suivant [73] :

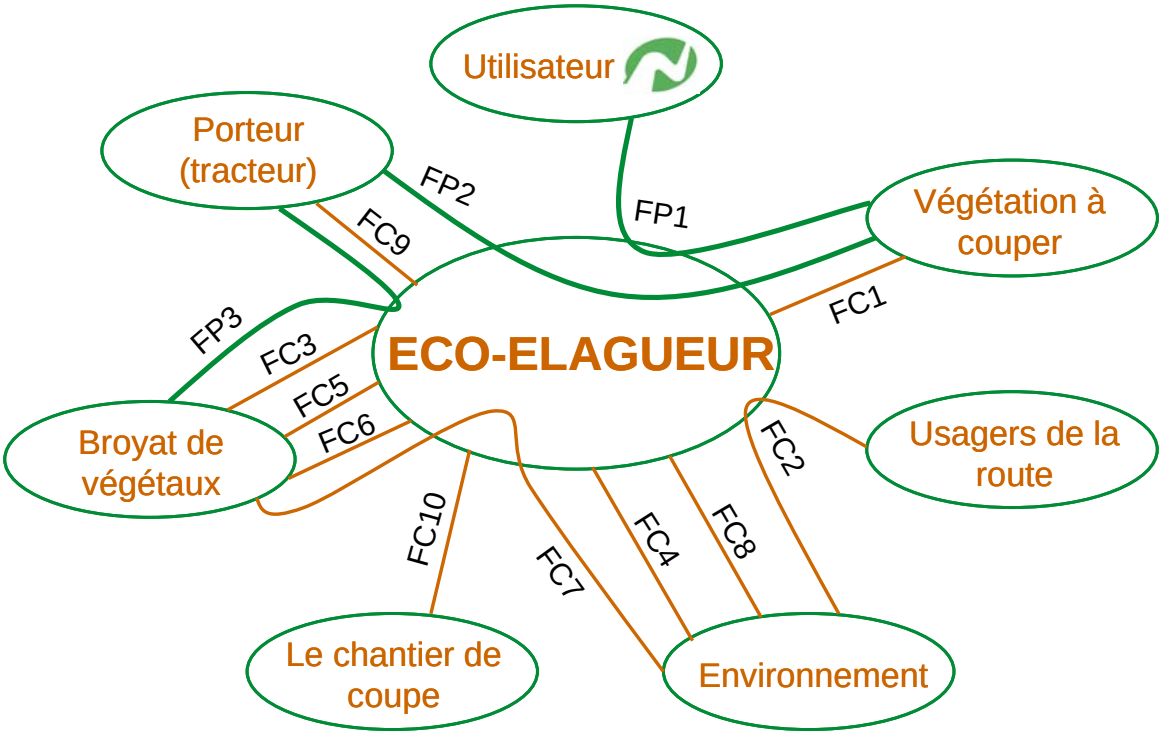


Figure 84 : Analyse de l'environnement du produit et insertion des fonctions principales

4.2.6 Ordonnancement des fonctions

Afin d'ordonnancer les fonctions précédemment énumérées, on utilise la méthode F.A.S.T. : Function Analysis System Technic, soit une analyse fonctionnelle des systèmes techniques. L'analyse F.A.S.T. [74] permet de préciser les possibilités de réalisation des fonctions de premier niveau. Elle conduit à

une succession de fonctions hiérarchisées. L'objectif est d'établir une relation BESOIN <-> SOLUTION. C'est un outil de description et d'analyse et non de recherche de solutions. Par contre, il exprime les besoins fonctionnels et la démarche vers la recherche de solutions.

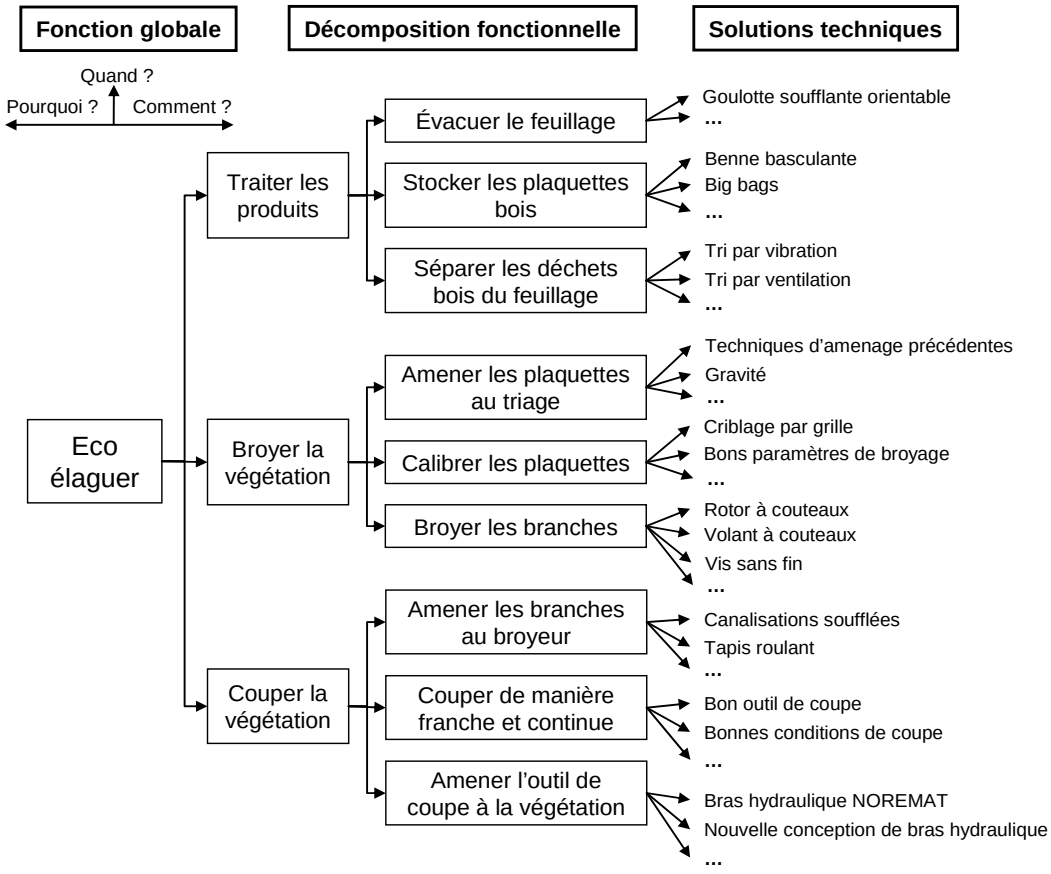


Figure 85 : Diagramme F.A.S.T. de l'éco élagueur

Le diagramme F.A.S.T. se lit de la manière suivante : on va de la gauche vers la droite en répondant à la question comment ? De plus, il y a une chronologie des étapes de bas en haut. De ce fait, lire le diagramme de droite à gauche nous renseigne sur le pourquoi de l'étape.

4.3 Recherches de solutions pour les fonctions principales

4.3.1 Inventaire des outils de coupe

L'inventaire des outils de coupe rentre dans le cadre du développement de la machine d'élagage/broyage/stockage de NOREMAT. Il s'agit de recenser les principes de coupe dans la plupart des domaines industriels et agricoles. Ce recensement n'est en aucun cas exhaustif mais donne une bonne photographie de ce qui se pratique. Cela rentre dans le cadre d'une démarche d'innovation de type analogique (paragraphe 4.1.1). Les domaines d'application usuels de ces systèmes de coupe sont très variés : la filière bois (en particulier), la métallurgie, l'alimentaire, l'agricole… Les technologies utilisées vont de la plus simple à la plus perfectionnée. Certes ces outils ne seront pas tous applicables

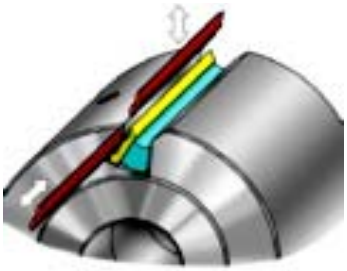
à notre domaine, certains seront trop chers, d'autres pas assez performants. C'est pourquoi chacun possède une note d'appréciation en fonction de plusieurs critères. L'inventaire complet se trouve en annexe de ce document (annexe 4)

4.3.2 Sélection du concept de coupe

Parmi l'ensemble des outils de coupe inventoriés certains remplissent la fonction COUPER (scie à ruban, tronçonneuse, jet d'eau…) et d'autres peuvent remplir la fonction COUPER et BROYER en même temps, ceux-là ont été sélectionnés :

- Le rotor à outils tranchants
- Le disque de coupe
- Le rotor à marteaux
- Le rasoir à tambour
- L'outil de cisaillement rotatif

Dans cette liste, certains ne présentaient pas de réelles innovations (rotor à marteaux, outil de cisaillement rotatif), d'autres présentaient des problèmes de sécurité vis-à-vis des usagers (disque de coupe) ou étaient déjà protégés par des brevets (rasoir à tambour). Seul restait le rotor à outils tranchants qu'il a bien sûr fallu adapter à l'élagage des haies de bords de routes.



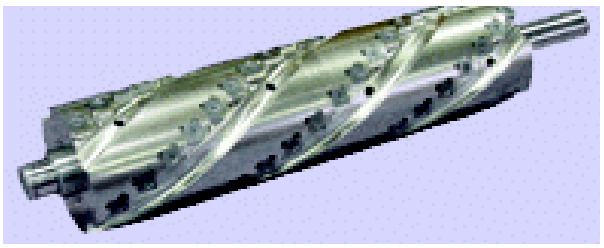


Figure 86 : Outils de rabotage depuis longtemps présents dans la seconde transformation du bois et ayant servi d'inspiration à la conception de l'outil de laboratoire

4.4 Présentation de l'outil de laboratoire

L'application des principes méthodologiques décrits lors du précédent chapitre nous a permis d'identifier le concept de coupe. Afin de valider ce concept, nous avons décidé de concevoir et de réaliser un prototype de laboratoire utilisable dans les locaux de l'ENSTIB. Ce prototype de laboratoire a donc été conçu et dessiner en CAO grâce au logiciel SOLIDWORKS de l'entreprise NOREMAT, puis a été fabriqué, monté et testé. C'est la version finale qui est présentée ici.

4.4.1 Présentation générale

L'outil se présente sous la forme d'un cylindre rotatif, d'axe vertical, sur lequel sont fixés des couteaux. Cet outil a été conçu pour être monté sur une toupie à axe vertical de puissance électrique.

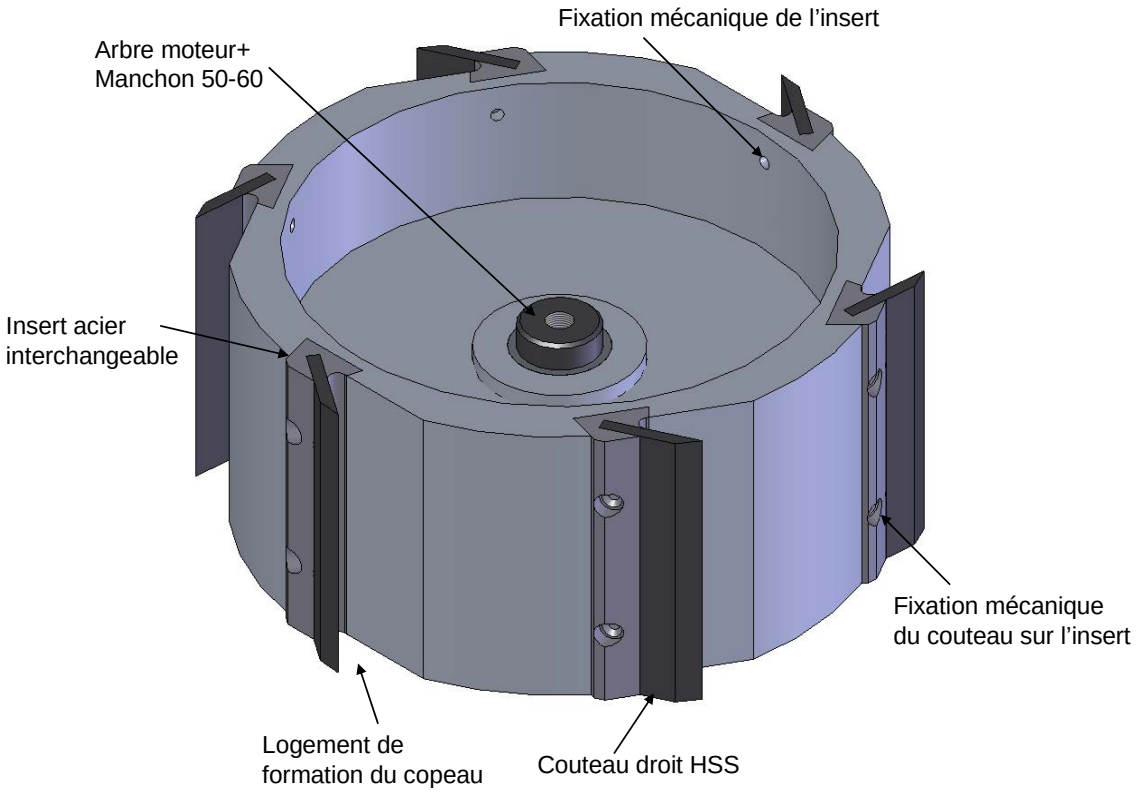


Figure 87 : Présentation de l'outil de laboratoire.

Si l'on se réfère à l'analyse de la croissance des haies (paragraphe 2.3.3), les branches de châtaignier grandissent d'environ 70 cm l'année qui suit la taille. Le diamètre de la base du rejet atteint alors les 10mm. Avec cette physionomie de branche, l'utilisation d'un outil de 400mm de diamètre de coupe nous permet de couper des branches possédant un diamètre moyen minimum de 5mm. De cette façon nous usinons un maximum de longueur de la branche sans trop s'occuper des branches trop fines incapables de faire de bonnes plaquettes. Toutes les branches seront donc usinées mais la partie fine au bout de celle-ci tombera à terre. Une hauteur de coupe importante permettra de couper des fagots plus importants mais alourdira de façon significative la masse du corps d'outil. C'est pourquoi nous nous sommes fixés 180mm de hauteur de coupe. Nous sommes également limités par la longueur de l'arbre de la toupie d'essais. Grâce à cette configuration d'outil, 400mm de diamètre et 180mm de haut, nous sommes en mesure d'utiliser des couteaux de tailles importantes, comparables aux couteaux des broyeurs. Analysons les différents choix techniques.

4.4.1.1 Fixation de l'outil

L'alésage du corps d'outil a volontairement été porté à 60mm alors que le diamètre d'arbre de la toupie est de 50mm. De cette façon, nous avons pu faire fabriquer un manchon intermédiaire dont les cotes ont été particulièrement soignées. Cette pièce joue le rôle de pièce martyre en cas de coincement de l'outil sur l'arbre.

4.4.1.2 Corps d'outil

La hauteur de coupe de l'outil, fixée à 180mm, ne permet pas une fixation sur l'arbre, c'est pourquoi un épaulement important a été fait. Pour des raisons de poids, le corps d'outil a également été évidé sur la partie basse. Afin d'assurer à la fois une légèreté et une bonne tenue mécanique, le corps d'outil a été usiné dans un rond d'aluminium extrudé de haute performance : l'AU8S.

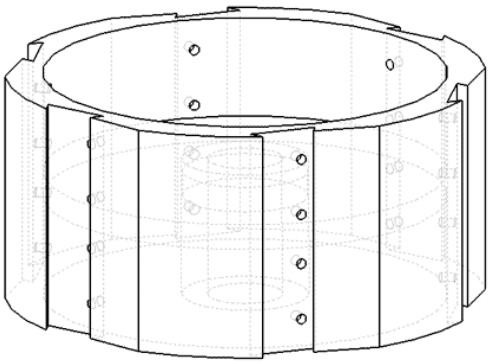


Figure 88 : Corps de l'outil en aluminium et usiné dans la masse

4.4.1.3 Variation de l'angle de coupe

Nous l'avons vu lors de l'étude de l'usinage du bois (paragraphe 3.1.9.1), l'angle de coupe est un des facteurs les plus importants lors de l'usinage. C'est pourquoi, l'outil est équipé d'inserts assurant l'assemblage entre les couteaux et le corps d'outil. Chaque type d'insert définit ainsi une géométrie de coupe (Figure 89).

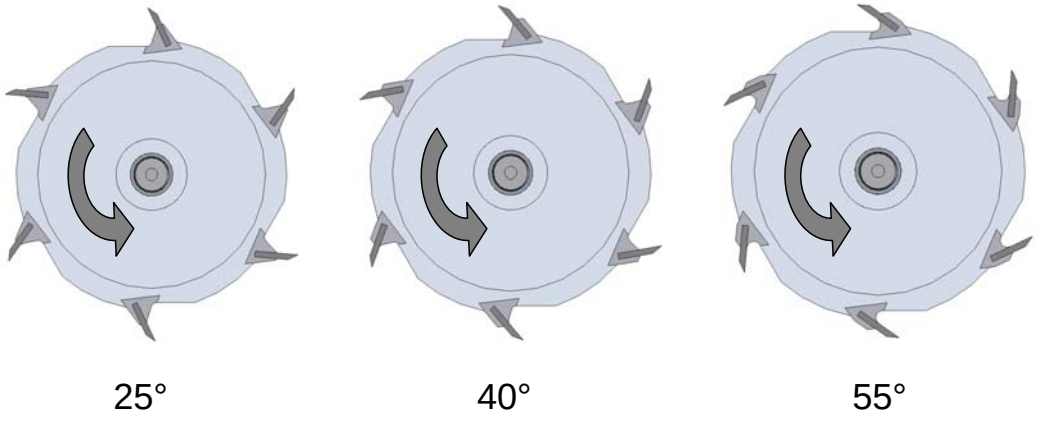


Figure 89 : Vue de dessus de l'outil : différentes configuration d'angles de coupe

Les angles ont été choisis de la façon simple : ne connaissant pas exactement quel angle allait être le meilleur, nous avons choisi de balayer un champ large. Nous sommes donc partis des angles de coupe les plus petits en rabotage (25°) pour aller vers les plus grands en broyage (55°), l'angle de 40° étant une valeur intermédiaire.

Les inserts assurent également le rôle de roule-copeau afin d'assurer une formation et une cassure optimales de la plaquette produite (Figure 90).

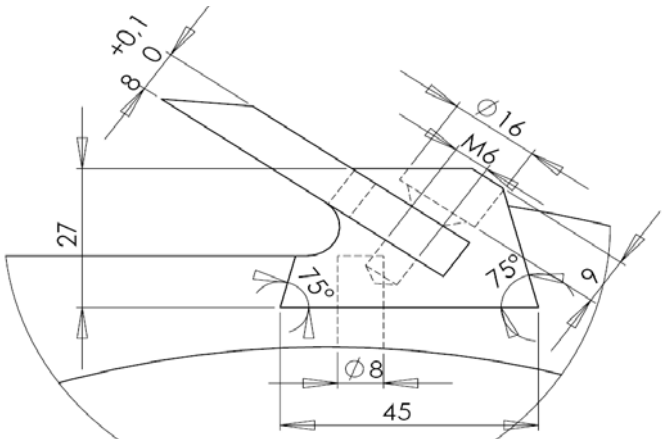


Figure 90 : Vue de dessin de l'assemblage {corps d'outil+insert 55°+couteau}, forme du roule copeau

4.4.1.4 Couteaux droits

Dans un premier temps, des couteaux de conception simple ont été choisis : il s'agit de couteaux droits de la longueur de l'outil (180mm), de 8mm d'épaisseur (épaisseur courante pour les couteaux de broyeurs) et possédant un angle de taillant de 30° (Figure 91). Nous l'avons vu auparavant, cet angle autorise une bonne pénétration dans la matière (branche) tout en assurant une tenue d'arête suffisante.

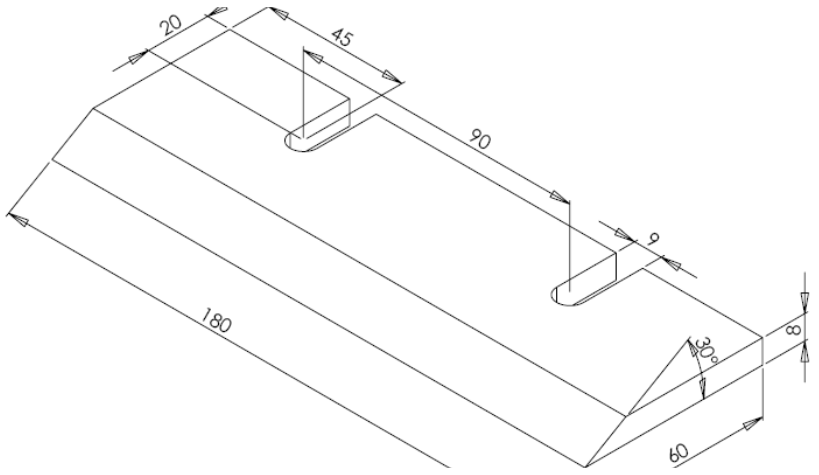


Figure 91 : Schématisation des couteaux utilisés

4.4.2 Etude mécanique de l'outil

L'étude mécanique de l'outil a pour but de vérifier sa tenue plutôt que de modéliser informatiquement le comportement de l'outil. Il s'agit ici de se placer dans la configuration la plus défavorable de l'outil et d'apprécier sa tenue en rotation et en coupe de façon simple.

4.4.2.1 Analyse cinématique

L'analyse cinématique de l'ensemble est des plus simples, on désignera par S0 le bâti machine et par S1 l'ensemble {arbre moteur+manchon 50-60+corps d'outil+insert+couteau}. Il existe alors une liaison pivot classique entre S0 et S1 (Figure 92).

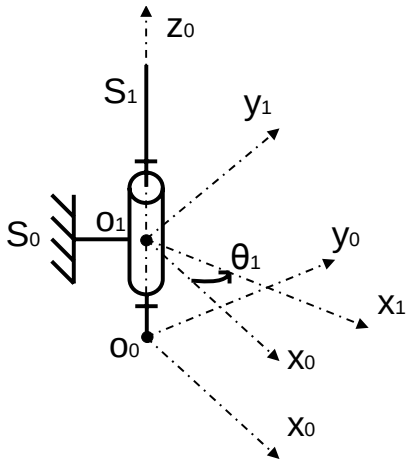


Figure 92 : Schéma cinématique de l'outil d'essais

Nous pouvons donc donner les équations de mouvement de l'outil :

$$\vec{P}(\vec{x}_1;\vec{y}_1) = R\vec{x}_1$$
$$\vec{P}(\vec{x}_0;\vec{y}_0) = R(\cos\theta\vec{x}_0 + \sin\theta\vec{y}_0)$$
$$\vec{V}(\vec{x}_0;\vec{y}_0) = R(-\dot{\theta}\sin\theta\vec{x}_0 + \dot{\theta}\cos\theta\vec{y}_0)$$
$$\vec{\Gamma}(\vec{x}_0;\vec{y}_0) = -R\vec{x}_0(\ddot{\theta}\sin\theta + \dot{\theta}^2\cos\theta) + R\vec{y}_0(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta)$$

Dans le cas d'un mouvement uniforme, nous avons l'accélération angulaire $\ddot{\theta}$ qui est nulle. Soit :

$$\vec{\Gamma}(\vec{x}_0;\vec{y}_0) = -R\dot{\theta}^2\cos\theta\vec{x}_0 - R\dot{\theta}^2\sin\theta\vec{y}_0 = -R\dot{\theta}^2\vec{P}(\vec{x}_0;\vec{y}_0)$$

4.4.2.2 Recensement et caractérisation des efforts

Pour effectuer l'étude mécanique de l'ensemble, nous nous sommes intéressés à la tenue mécanique de l'ensemble en rotation et nous nous sommes placés dans les conditions les plus défavorables pour l'outil. En rotation libre (sans usinage), l'ensemble est soumis à son poids ainsi qu'à la force

centrifuge. Le poids de l'ensemble est compensé par la réaction verticale de l'arbre moteur.

L'expression de la force centrifuge est alors: $\vec{A}_{centrifuge}(P \to G) = -\frac{\left|\vec{V}(P \to G)\right|^2}{R}\vec{x}$

$$\sum \vec{F}_{ext \to P} = M\vec{A}_{centrifuge}(P \to G)$$

En projetant sur l'axe : $Fx_{ext \to P} = -\frac{M\dot{\theta}^2}{R}$

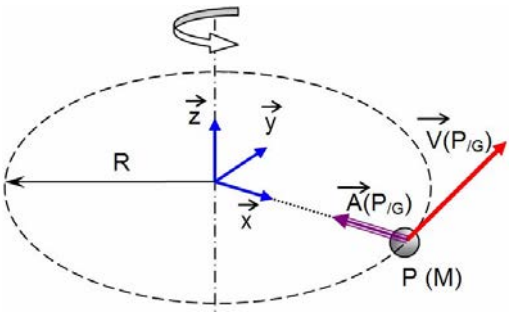


Figure 93 : Représentation schématique de l'action de la force centrifuge

Il est important de connaître la tenue à l'arrachement de la fixation des outils. On applique donc la formule suivante à l'ensemble {insert glissé+couteau}. L'ensemble pèse 1.6kg, tourne à une vitesse de 62m/s, au maximum, à une distance de 0.175m du centre de l'outil. Soit une force centrifuge de 35 145N. Lors de l'usinage, l'effort de coupe vient s'ajouter à celui de la force centrifuge. A l'heure actuelle, nous sommes incapables de calculer de façon précise l'effort de coupe en fonction d'une branche donnée. Il est cependant possible d'en estimer la grandeur grâce aux travaux de KIVIMAA [40], suivi de MARTIN [38] qui ont établi la formule suivante pour le mode de coupe B : F=40+120e.

Dans cette formule, « e » est l'épaisseur de copeau en mm et « F » l'effort de coupe par cm de largeur de coupe. Cette formule a été établie pour du hêtre à 12% d'humidité avec un outil usé à 50% et un angle d'attaque de 30°. Dans le cas d'une branche de 5cm de diamètre, l'effort de coupe s'élèvera à 3200N supplémentaires. Il s'agit d'une limite haute car le hêtre est une essence dense, l'humidité sera nettement plus importante et l'angle d'attaque sera plus important. Ces facteurs diminueront d'autant l'effort de coupe total. C'est donc en positionnant les efforts de coupe et de rotation que nous avons effectué les calculs sous éléments finis qui suivent. Ces calculs ont été effectués sous le logiciel COSMOS. Nous avons repris les dessins en CAO, nous en avons appliqué des conditions aux limites et les forces (Figure 94), nous avons maillé l'ensemble et observé les résultats.

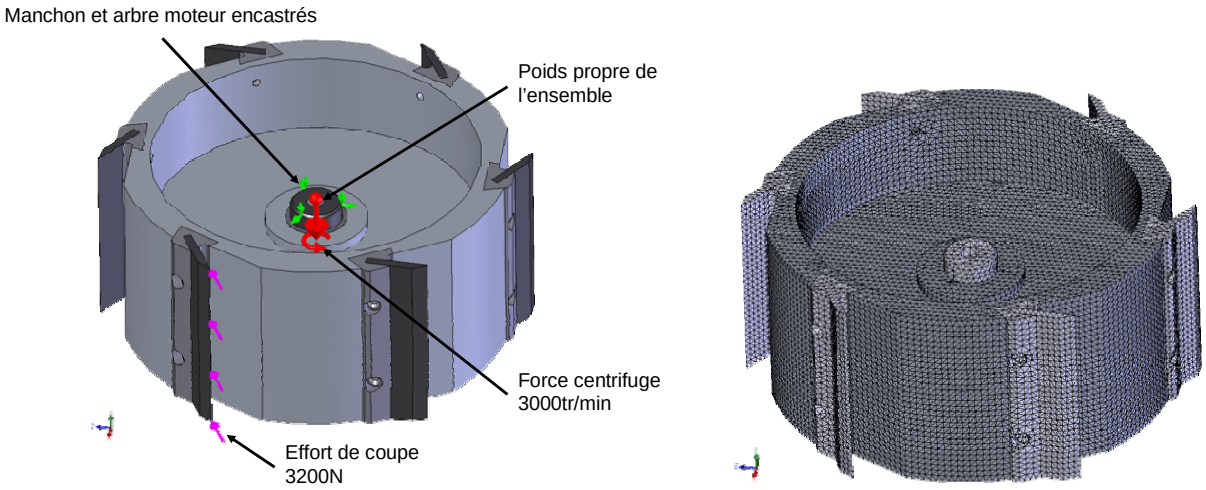


Figure 94 : A gauche, chargement du système lors de la coupe d'une branche de 5 cm et à droite maillage du système.

Les calculs étant faits, nous observons les zones où des concentrations de contraintes apparaissent, ces concentrations sont décrites Figure 95 et plus en détail Figure 96.

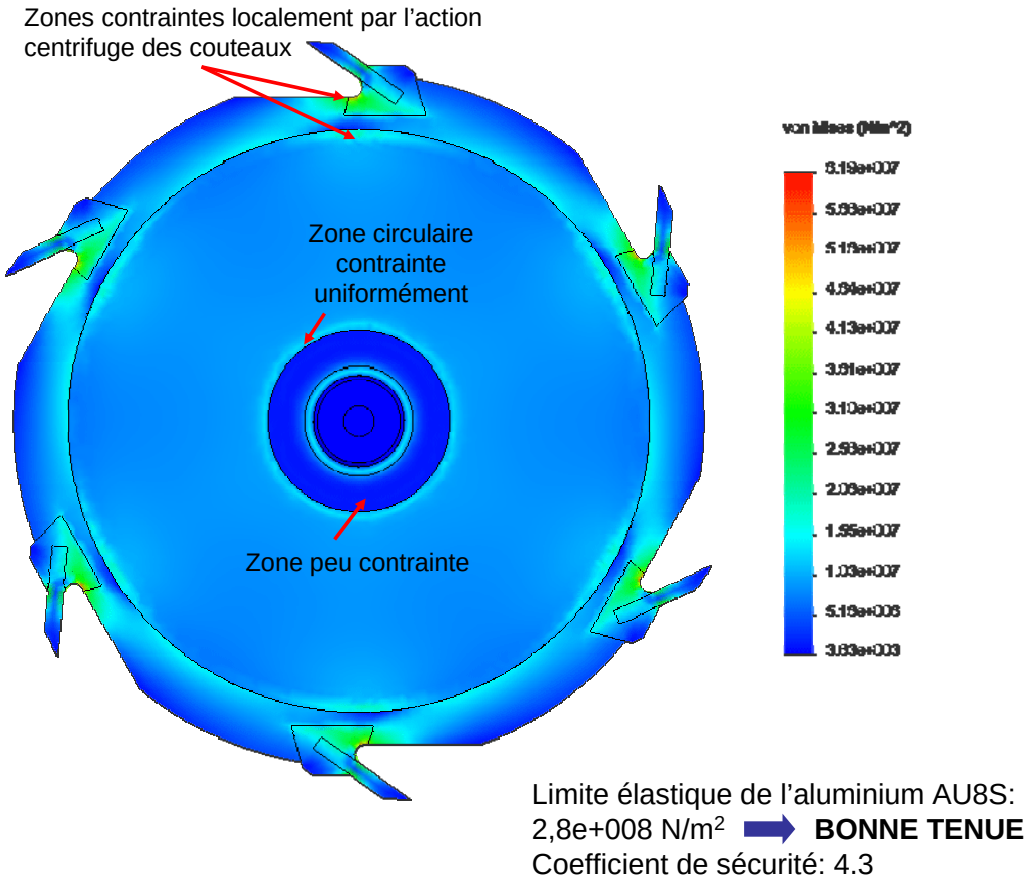

Zones contraintes localement par l'action centrifuge des couteaux
Zone circulaire contrainte uniformément
Zone peu contrainte
Limite élastique de l'aluminium AU8S: 2,8e+008 N/m2
BONNE TENUE
Coefficient de sécurité: 4.3

Figure 95 : Répartition des contraintes dans l'outil lors de l'usinage

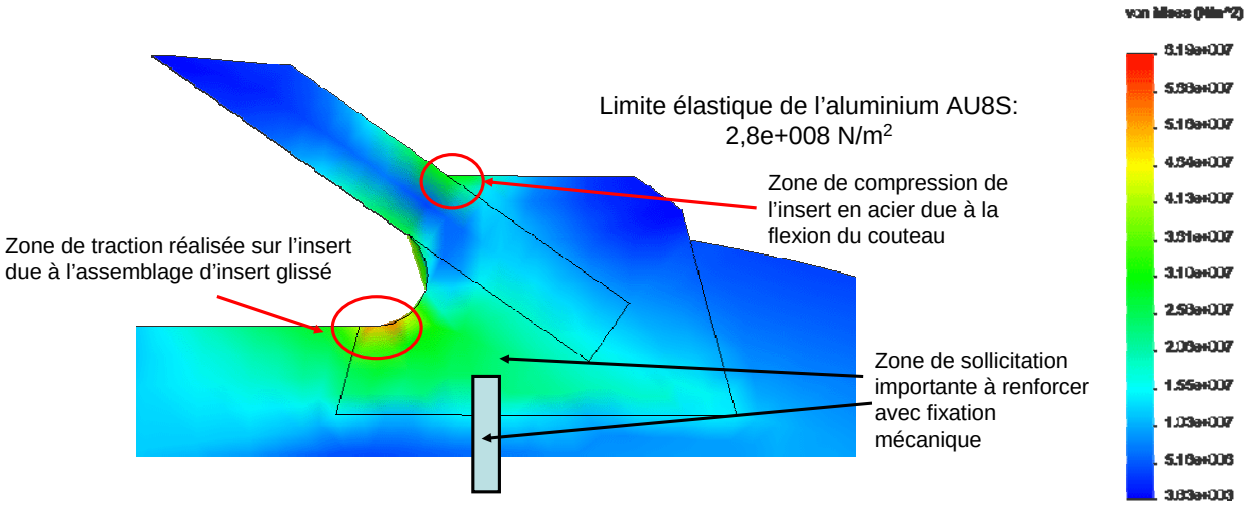

Limite élastique de l'aluminium AU8S:
2,8e+008 N/m2
Zone de compression de l'insert en acier due à la flexion du couteau
Zone de traction réalisée sur l'insert due à l'assemblage d'insert glissé
Zone de sollicitation importante à renforcer avec fixation mécanique

Figure 96 : Grossissement de la zone d'accroche de l'outil.

Dans les calculs et dans la réalité, la matière la plus fragile est l'aluminium AU8S possédant une limite élastique de 2.8e+008 N/m^2. Nous nous apercevons que les zones les plus sollicitées (zones rouges) n'atteignent pas cette limite. Grâce à ces calculs nous sommes en mesure de valider de façon théorique la tenue à la rotation et à l'usinage de l'outil de coupe de laboratoire.

4.5 Analyse des conditions de coupe de l'outil de laboratoire

L'objet de ce chapitre est d'analyser, en se référant aux connaissances acquises lors du paragraphe 3.1, les conditions d'usinage procurées par l'outil de laboratoire.

4.5.1 Utilisation de l'outil – modes de coupe

Dans le cas de l'utilisation de notre outil sur une branche, nous sommes dans un cas un peu particulier : en effet, l'outil, en rotation verticale, usine les branches dont la fibre neutre est considérée comme normale au plan de la haie. Lorsque l'outil attaque la branche, l'arête de coupe est perpendiculaire aux fibres du bois et l'arête de coupe se dirige dans l'axe des fibres de la branche. Durant l'usinage, la situation évolue car l'arête de coupe rentre de plus en plus dans la branche, de cette façon elle devient de plus en plus normale aux fibres du bois. En fin d'usinage, l'arête de coupe est devenue complètement perpendiculaire aux fibres du bois et nous voici en présence d'un usinage 90-90 (Figure 97). Cette définition du mode de coupe spécifique à cet usinage part de l'hypothèse que les branches sont normales au plan de la haie. Dans la nature, il est clair que celles-ci ne respectent pas souvent cette loi.

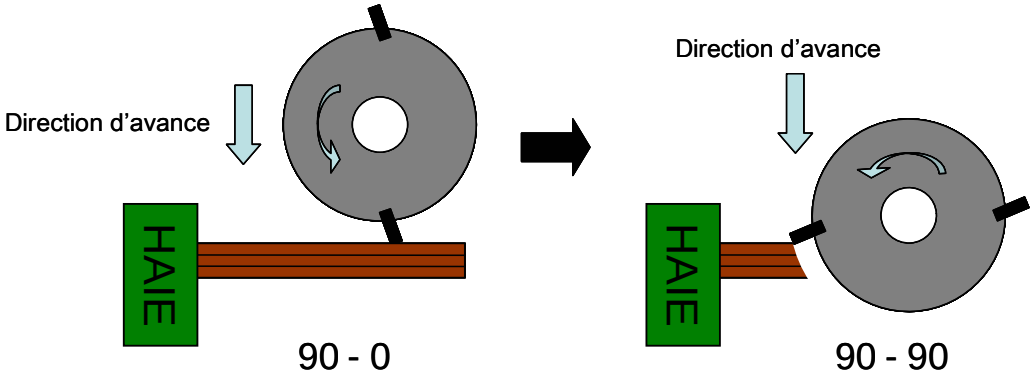


Figure 97 : Evolution des modes de coupe pendant l'usinage d'une branche par l'outil innovant

4.5.2 Formation du copeau – efforts de coupe

Dans le cas de notre usinage, la branche est coupée et les copeaux sont formés par passage successifs des dents de l'outil, l'effort de coupe se décompose alors comme précédemment en une composante parallèle à l'axe de la route (Fx) et une parallèle à la branche (Fy) (Figure 98).

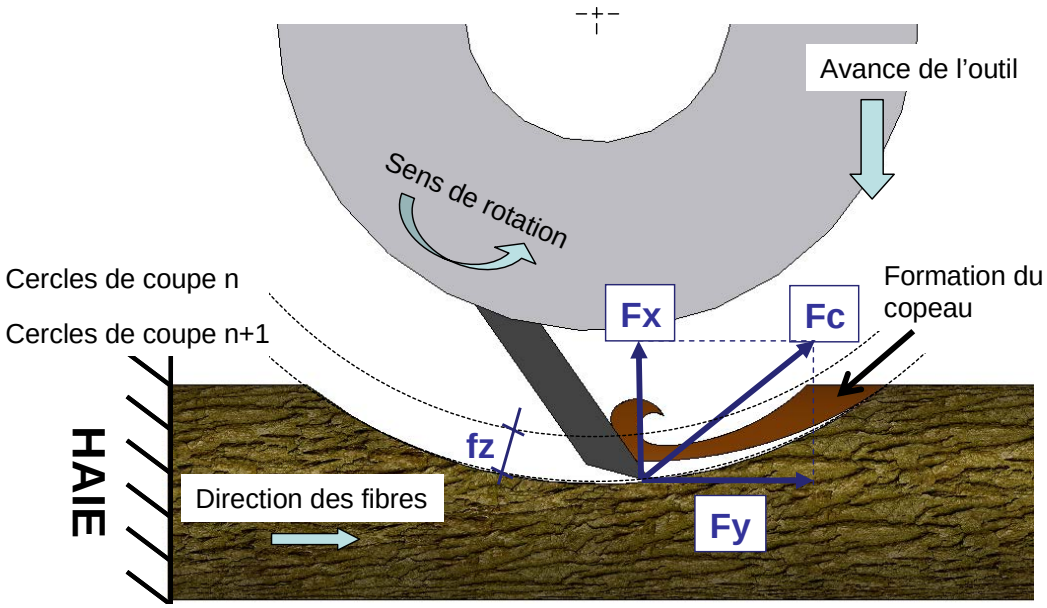


Figure 98 : Description de la coupe et mise en place des efforts de coupe (vue de dessus)

Si l'on considère désormais la branche comme un élément flexible lors de sa coupe, la composante Fx aura pour effet de faire osciller la branche et la composante Fy fera travailler celle-ci longitudinalement, soit en traction, soit en compression. Nous savons, d'ores et déjà que ces composantes seront importantes pour la conception du futur outil. Il parait clair que, dans le cas où la branche n'est pas maintenue durant la coupe, Fx devra être minimisée au profit de Fy. Comme nous l'avons vu, la principale difficulté de cet usinage réside dans le fait de couper un élément flexible, qui risque de se plier devant l'effort de l'outil. Sur la Figure 98, nous nous apercevons que nous avons tout

intérêt à favoriser la composante Fy qui rigidifierait la branche par traction et à limiter la composante Fx qui aurait tendance à repousser la branche en début d'usinage et à la ramener vers lui en fin.

4.5.3 Cas particulier de la coupe en avalant

Nous nous sommes posés la question du mode de coupe que nous devions utiliser pour l'outil de laboratoire. Le mode de coupe en avalant a été écarté car celui-ci, en début d'usinage, fait travailler la branche en compression (et non en traction), ce qui provoque des cassures et de grosses projections. Nous avons pu le vérifier lors des essais préliminaires avec les trois angles de coupe. En dehors du fait que les branches sont cassées et non coupées, nous ne maîtrisons ni la formation des copeaux, ni les projections qui résultent de ce mode de coupe (Figure 99). Le mode de coupe en opposition est présenté (Figure 97).

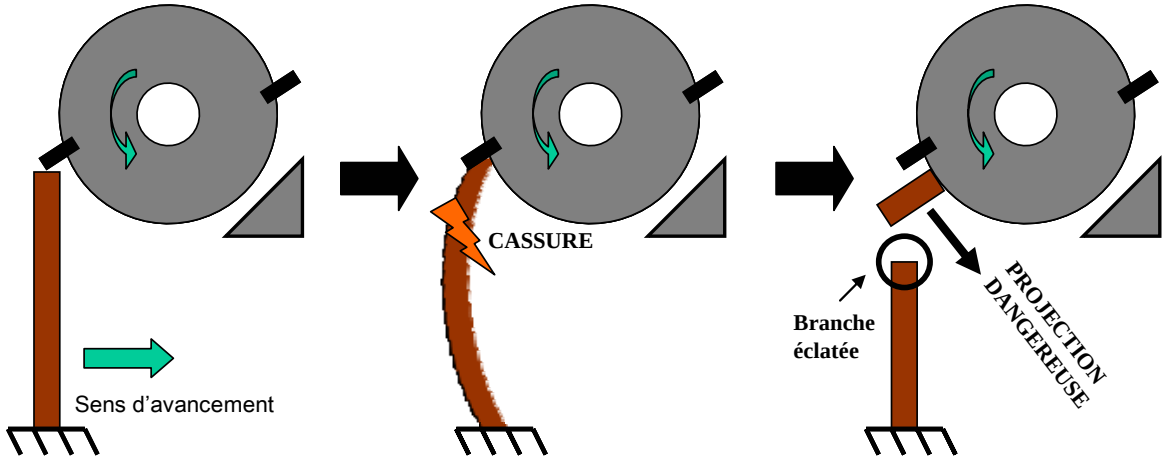


Figure 99 : Phénomènes de cassures liés à l'usinage en avalant

Le schéma précédent montre ce qu'il se déroule lors de l'usinage des branches en avalant : la branche vient se coincer entre l'outil et sa fixation et se casser sous l'effort d'usinage.

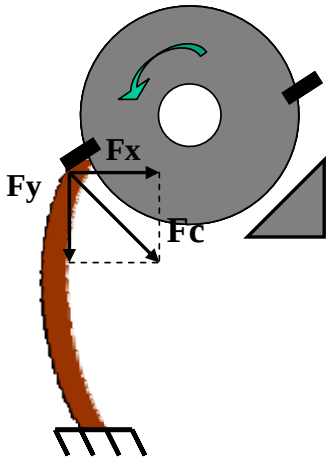


Figure 100 : Effort de coupe mis en jeu lors d'un usinage d'une branche en avalant

4.5.4 La captation des copeaux formés

4.5.4.1 Vitesse de coupe

Une des particularités de l'usinage est que les vitesses de coupe peuvent être très différentes suivant le type d'usinage et les matériaux (de l'outil et le bois). Ainsi la vitesse de coupe peut s'échelonner entre 20 m/s et plus de 100 m/s. Cette variabilité entre les vitesses de coupe entraîne des différences d'énergie cinétique entre les particules projetées. En effet la vitesse initiale de la particule étant proche de la vitesse de coupe. La trajectoire de la dite particule sera également influencée par sa taille, sa forme, sa masse et les frottements de l'air :

- La vitesse des petites particules décroît plus rapidement à densité égale.
- La vitesse des particules légères décroît plus rapidement à volume égal.

Il est cependant nécessaire de préciser que la nature générale des particules projetées est très hétérogène, particulièrement en taille.

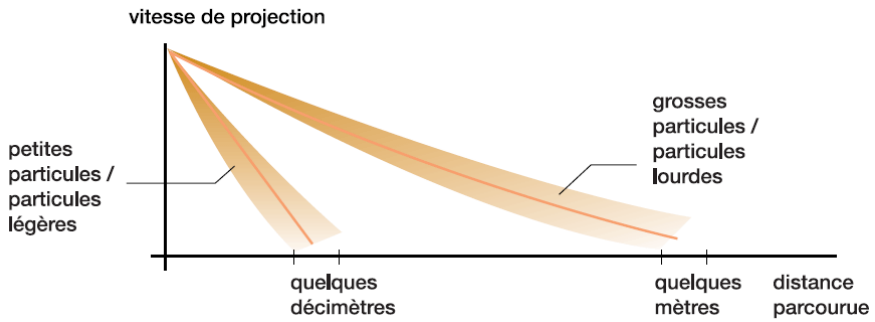


Figure 101 : Distance parcourue par les particules pour une vitesse de coupe donnée [75]

4.5.4.2 Caractéristiques des particules

Comme dans l'usinage de la plupart des matériaux les caractéristiques des particules formées durant l'opération d'usinage dépendent de nombreux paramètres :

- Du matériau usiné
- Des paramètres d'outil : angles, formes, matériaux…
- Type d'usinage : corroyage, défonçage, déroulage…opposition, avalant
- Conditions de coupe : vitesse d'amenage, vitesse de rotation…

4.5.4.3 Direction de projection des particules

Lors de la coupe d'une pièce de bois par un outil rotatif (par un outil linéaire également), le copeau est tout d'abord emprisonné entre l'outil et la pièce puis fini par être libéré. Lorsque celui-ci est libéré, il est projeté dans une direction particulière appelée « direction de projection ». Cette direction suit deux

tangentes : celle du cercle de coupe de l'outil et celle de la pièce en cours d'usinage. La source de projection est l'ensemble des points appartenant au matériau et à l'outil au moment où les particules sont éjectées.

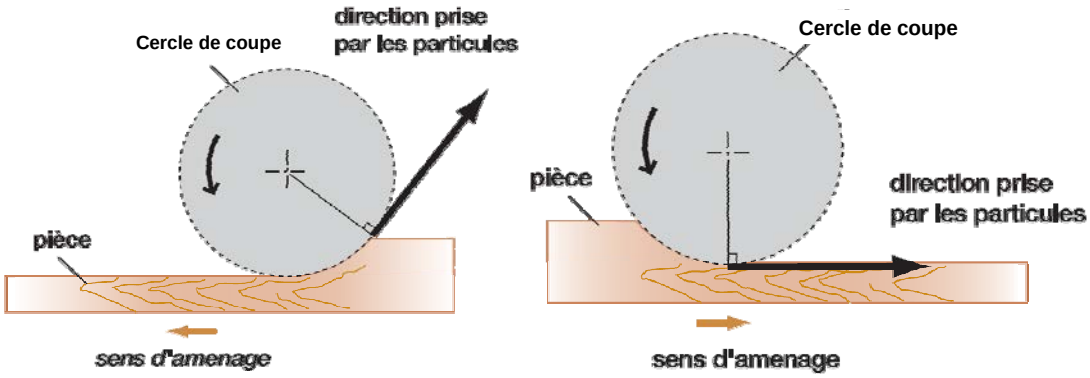


Figure 102 : A gauche, direction de projection lors d'un travail en opposition et à droite, en avalant [75].

Partant de ce constat, on devine aisément que cette direction change également avec le diamètre de l'outil (diamètre du cercle de coupe) et avec la prise de passe (tangente de la pièce en cours d'usinage) :

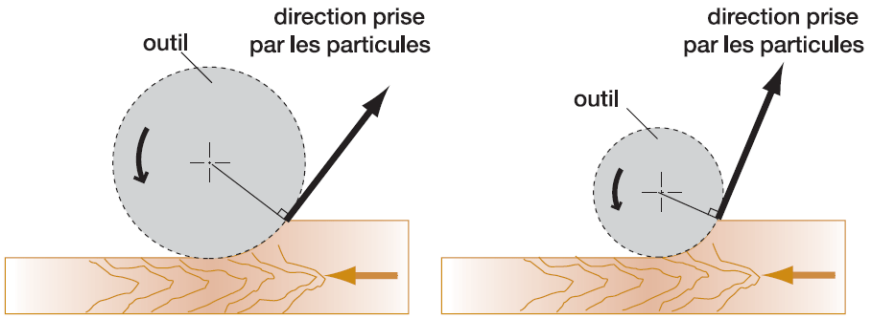


Figure 103 : Variation de la direction de projection en fonction du diamètre d'outil (prise de passe constante)

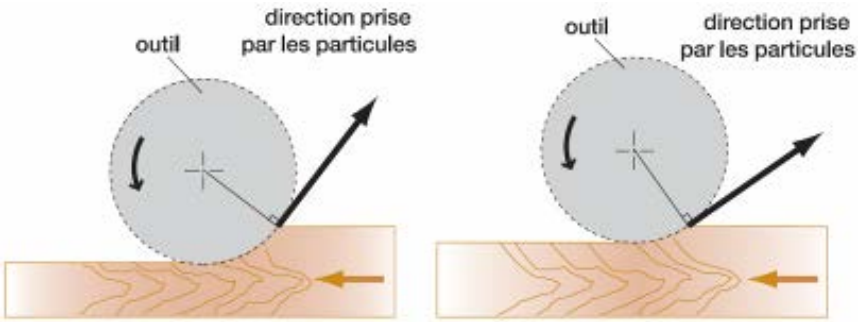


Figure 104 : Variation de la direction de projection en fonction de la prise de passe (diamètre d'outil constant)

4.5.4.4 Positionnement des éléments machines

Après ce que nous venons de voir, la direction de projection des copeaux au cours de l'usinage peut se schématiser ainsi :

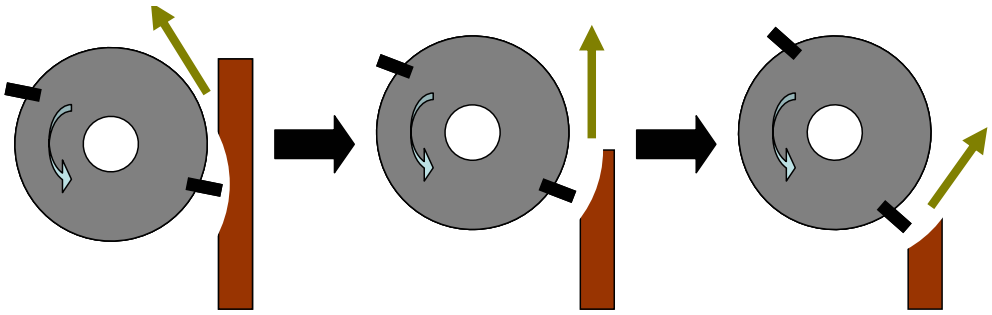


Figure 105 : Variation de la direction de projection des copeaux au cours de l'usinage

Ainsi l'ouverture du système de captage des copeaux doit avoir une ouverture suffisante pour limiter les pertes matières. Il doit être positionné dernière l'outil de la façon suivante :

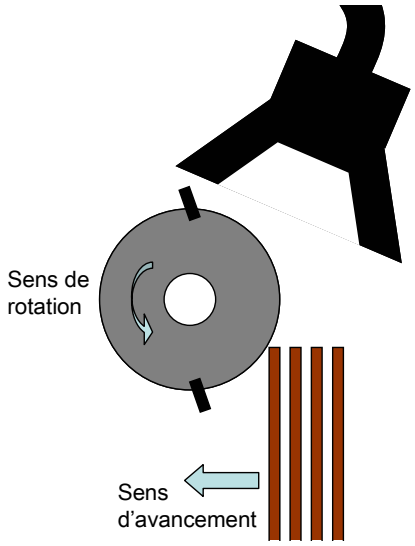


Figure 106 : Disposition schématique du dispositif de captage

4.6 Conclusions

En nous inspirant de deux méthodologies de conception complémentaires que sont la méthode APTE et la méthode TRIZ, le concept de coupe a pu être déterminé de façon rigoureuse. A la suite d'une étape de conception en CAO, puis d'une vérification rapide de sa tenue dynamique en éléments finis, l'outil est désormais au point et est près à former ces premiers copeaux. Ce concept de coupe répond aux exigences du cahier des charges. La partie finale de ce chapitre a été dédiée à la partie récupération des copeaux qui s'avère être délicate à cause d'un angle de projection important.

Chapitre 5. ESSAIS DE COUPE ET DE BROYAGE DES BRANCHES EN LABORATOIRE

Le concept de coupe a été trouvé grâce aux méthodes d'innovations utilisées en industrie. Ce concept de coupe a été analysé avec les outils et les connaissances scientifiques de l'usinage du bois. Il est désormais temps de le valider, de le tester et de l'approfondir par des essais.

Pour des raisons de coûts et de confidentialité, ces essais ont été faits dans des conditions expérimentales, dans les locaux de l'ENSTIB.

5.1 Objectifs – Protocole expérimental

Cette phase d'essais aura pour but de confirmer si oui ou non l'outil que nous avons conçu est efficace et rentre dans le cahier des charges que nous nous sommes fixés surtout en terme de qualité de coupe, puissance consommée, qualité des produits fabriqués.

5.1.1 Analyse des paramètres influant la coupe des branches

Dans le domaine de l'accoroutage, tout comme dans l'usinage bois classique (Figure 59), de nombreux paramètres influencent la coupe des branches, nous avons donc élaboré un diagramme causes-effet pour la formation des copeaux avec l'outil de laboratoire.

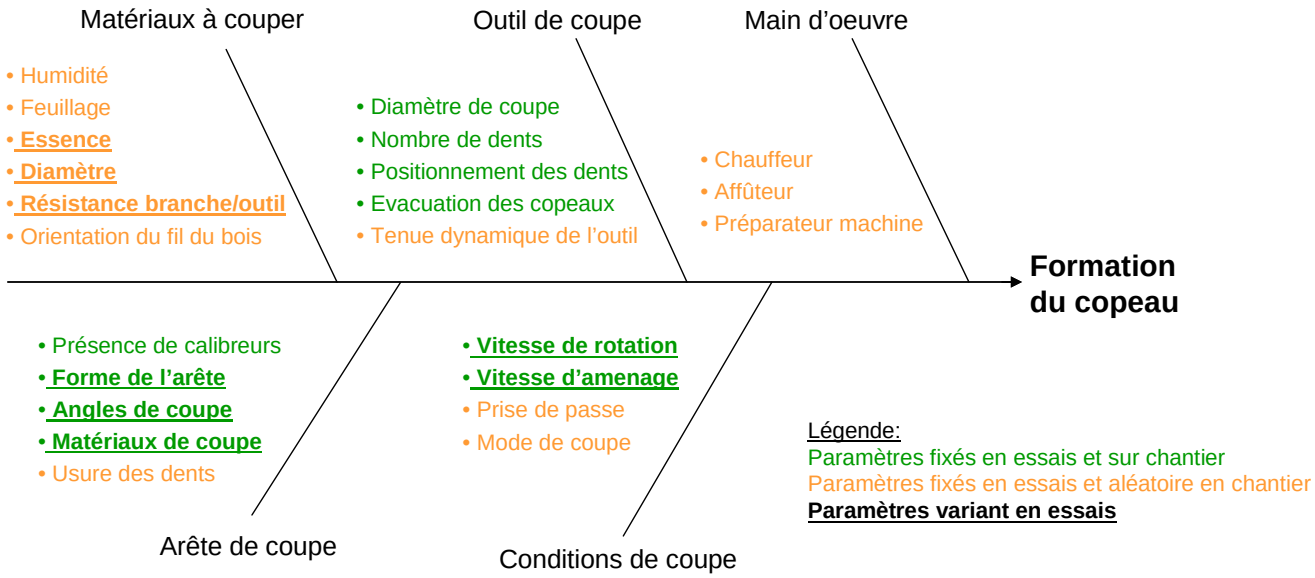


Figure 107 : Diagramme cause-effets de la formation des plaquettes

Lors de la mise en place des tests, certains paramètres de coupe seront fixés afin de s'affranchir des diversités naturelles des branches. Lors des essais en laboratoire, nous avons donc choisi de fixer les paramètres suivants :

- Les paramètres inhérents aux branches et à la main d'œuvre
- La conception de l'outil fixe également la prise de passe et le mode de coupe

Pour les essais de laboratoire, certains paramètres varieront:

- Vitesse de rotation
- Vitesse d'amenage
- Angles de coupe

5.1.2 Protocole expérimental

5.1.2.1 Type de branches choisies

Afin de comparer les conditions de coupe de l'outil entre elles, le frêne a été choisi. C'est une essence commune dans les haies françaises donc facilement accessible pour les essais. Nous avons choisi des branches fraîches (moins de 24H de coupe) de 3 ou 4 ans d'âge afin de se positionner sur le marché des entretiens bocagers. Les branches, de 5 cm de diamètre environ au niveau du tronc mesurent 4 ou 5 m de long, nous les recoupons afin d'obtenir un diamètre de coupe compris en 2 et 5cm. Cela correspond à 1m35 de long de façon courante. Nous l'avons vu précédemment, la branche attachée au tronc peut être assimilée à une poutre encastrée, assemblage naturel possédant une certaine raideur, non connue. Afin de s'affranchir de cette raideur inconnue, nous laissons une partie du tronc sur les branches d'essais. De cette façon, nous pouvons également former un parallélépipède plus facile à fixer qu'un cylindre.

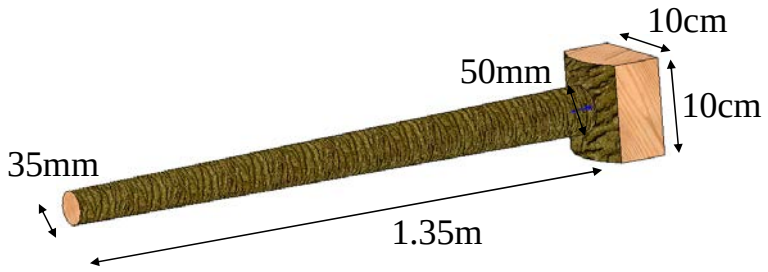


Figure 108 : Schéma de découpe d'une branche à l'usinage

5.1.2.2 Prélèvement des branches

Le lieu de prélèvement fut choisi proche de la ville d'Epinal (88), possédant un paysage forestier appréciable. Parmi les différentes possibilités, la municipalité de Dogneville, petit village proche d'Epinal nous a donné son accord pour le prélèvement des branches en vue de la réalisation des essais. La commune de Dogneville possède une surface forestière de 268 hectares.

Figure 109 : Situation du lieu de prélèvement des échantillons de branches pour les essais.

La forêt présente sur le site de prélèvement est très diversifiée tant sur son mode d'exploitation que sur les essences disponibles. De cette manière, il a été facile de trouver le type de morphologie des arbres présents sur les bords des routes et le Frêne (*Fraxinus L.)* nécessaire à nos essais.

En bordure de chemin forestier, nous avons sélectionné les Frênes possédant des branches les plus perpendiculaires possible au tronc pour l'adaptation au banc d'essais, puis nous les avons prélevées. Il va de soi que la rectitude des branches a été recherchée. Nous avons choisi de couper trois branches pour chacun des essais en laboratoire. Malheureusement, ces trois branches ne proviennent pas nécessairement du même arbre.

Figure 110 : A gauche type d'arbres recherchés pour les essais [19], et, à droite, exemple d'un arbre présentant de bonnes dispositions.

5.1.2.3 Paramètres de coupe choisis

Nous avons donc fait varier les différents paramètres de coupe que nous avons cités précédemment :

- Vitesse d'amenage : 0.5 km/h (8.3 m/min), 1 km/h (16.6 m/min) et 1.5 km/h (25m/min vitesse couramment utilisée par les machines d'élagage de branches).
- Vitesse de rotation de l'outil : 400 tr/min (8.2 m/s de vitesse de coupe), 800 tr/min (16.3 m/s de vitesse de coupe), 1200 tr/min (24.7 m/s de vitesse de coupe), nous avons essayé de prendre un écart conséquent pour une observation correcte des résultats.
- L'angle de coupe des couteaux de l'outil : 25°, 40°, 55°.

5.1.2.4 Nombre d'essais

Nous avons choisi d'effectuer l'intégralité des essais et de ne pas avoir recours à un plan d'expérience car nous ne connaissions pas de façon certaine quels étaient les paramètres les plus influents sur la qualité des plaquettes, ni leur degré d'influence. En effet, une fois la machine réglée, les essais se font assez rapidement (environ deux heures pour un essai complet de trois branches) et sans coût particulier (la branche uniquement). Nous avons donc effectué : $N_{essais} = 3_{amenage} * 3_{rotation} * 3_{angles} = 27$ essais.

N° essais	Vitesse de rotation (tr/min)	Angle de coupe (°)	Nbr de couteaux	Vitesse d'avance (km/h)
1	400	25	6	0,5
2	400	25	6	1
3	400	25	6	1,5
4	400	40	6	0,5
5	400	40	6	1
6	400	40	6	1,5
7	400	55	6	0,5
8	400	55	6	1
9	400	55	6	1,5
10	800	25	6	0,5
11	800	25	6	1
12	800	25	6	1,5
13	800	40	6	0,5
14	800	40	6	1
15	800	40	6	1,5
16	800	55	6	0,5
17	800	55	6	1
18	800	55	6	1,5
19	1200	25	6	0,5
20	1200	25	6	1
21	1200	25	6	1,5
22	1200	40	6	0,5
23	1200	40	6	1
24	1200	40	6	1,5
25	1200	55	6	0,5
26	1200	55	6	1
27	1200	55	6	1,5

Figure 111 : tableau récapitulatif des essais

5.2 Matériels et méthodes

5.2.1 Description du banc d'essais de laboratoire

Le banc d'essais a été monté dans l'enceinte de l'ENSTIB sur du matériel d'essais existant. Le précédent chercheur à travailler sur ce banc fut J.BOUCHER [49] dans le cadre de sa thèse sur la coupe rotative du bois. Nous avons donc repris et adapté le banc d'essais existant afin de pouvoir étudier la coupe rotative de branches par un outil d'élagage de laboratoire. Pour des raisons de sécurité, il était important de bien séparer la partie coupe des branches de la partie pilotage du banc et prise de mesures (partie entièrement fermée et donc protégée).

Pour assurer une bonne coupe de branches, il est primordial d'utiliser trois organes bien spécifiques : l'amenage de la branche, la partie active de la coupe en rotation et la récupération des produits fabriqués par aspiration. Ces trois organes ont complètement été revus et adaptés à cet usinage un peu particulier.

5.2.1.1 Partie coupe

L'outil de coupe est monté sur une toupie à axe vertical et est mis en rotation par énergie électrique. Le moteur électrique est relié à un variateur de vitesse afin de faire varier la vitesse de rotation de l'outil de 100 à 2000 tr/min. La puissance électrique consommée est également mesurable grâce à un WATTPILOT. La table de la toupie assure un guidage des branches vers l'outil.

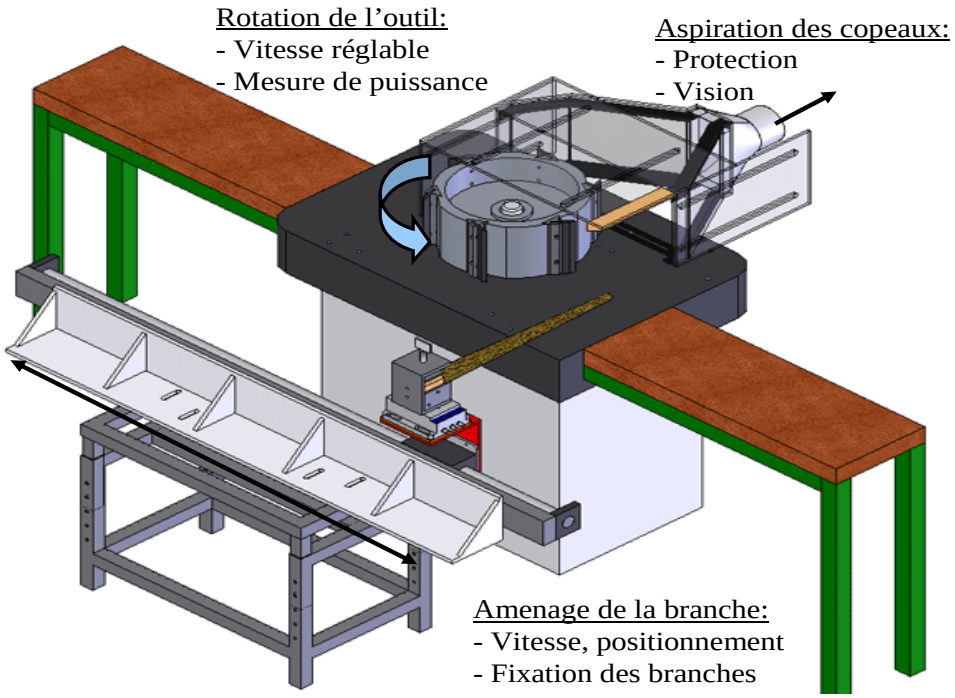


Figure 112 : Dessin CAO de la partie coupe du banc d'essais avec descriptif des différents organes présents.

5.2.1.2 Partie amenage

La fixation de la branche est tout d'abord spécifiquement conçue pour assurer une tenue optimum de la branche pendant la coupe. Il a également fallu prévoir les aléas des formes des branches (Figure 113). L'amenage longitudinal des branches est assuré par un plateau monté sur un axe magnétique. De cette façon, il est facile de paramétrer l'avance que l'on souhaite (vitesse, accélération, positionnement, cycles).

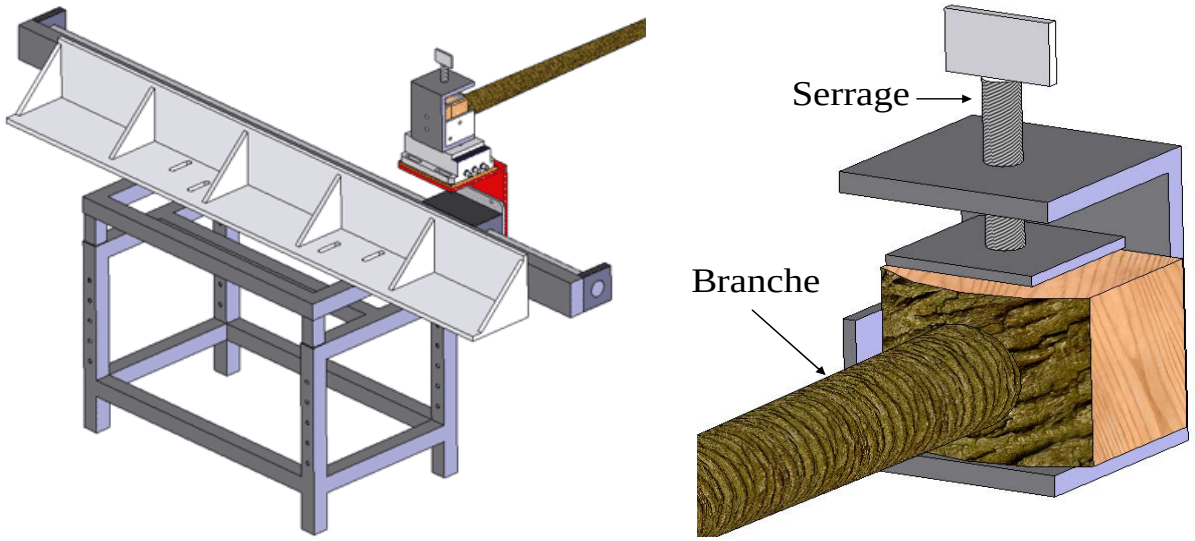


Figure 113 : Vue d'ensemble du système d'amenage et fixation de la branche sur l'amenage

5.2.1.3 Partie récupération.

La récupération des plaquettes est primordiale car elle va permettre de caractériser ceux-ci en granulométrie. Nous avons réalisé un capot de récupération pour les plaquettes, fixé derrière l'outil de coupe. Ce capot, transparent (Figure 114) a permis plusieurs choses :

- La visualisation de la coupe par caméra.
- La canalisation des copeaux après leur fabrication afin de ne pas en étaler partout autour de l'outil
- Un test de mode de récupération à la lumière des connaissances acquises précédemment (paragraphe 4.5.4). En effet, nous souhaitons valider un mode de récupération des copeaux pour le prototype grandeur nature.

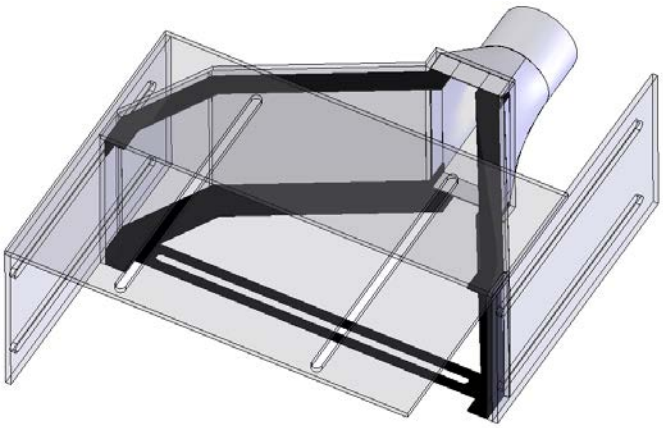


Figure 114 : Module d'aspiration de copeaux

5.2.1.4 Partie mesures

Grâce à ce banc d'essais, nous sommes en mesure de couper des branches très variables (longueur, diamètre…), à des conditions de coupe très variée (vitesse d'avance, vitesse de rotation…) tout en récupérant les produits formés, en mesurant la puissance électrique absorbée et en filmant la coupe.

La puissance électrique absorbée par le moteur de la toupie donne une indication sur la consommation énergétique lors de la coupe d'une branche. Cette mesure est effectuée au moyen d'un appareil appelé WATTPILOT qui mesure, enregistre et retranscrit la consommation de puissance électrique d'un appareil. Le deuxième critère est la granulométrie des plaquettes/copeaux produits : ceux-ci peuvent être caractérisés en granulométrie grâce au dispositif présenté Figure 115. Afin de filmer les usinages, une caméra numérique a été placée au dessus de l'outil pour enregistrer l'usinage. Pour chaque test, nous avons effectué la coupe de trois branches afin de pouvoir observer une récurrence.

Figure 115 : Schéma d'une tamiseuse de laboratoire et d'un tamis de 10mm

5.2.2 Méthodes de mesures

5.2.2.1 Puissance électrique consommée par l'outil en rotation

Afin de montrer quels sont les résultats obtenus par le WATTPILOT, nous avons mesuré la puissance consommée par l'outil en simple rotation, sans usinage.

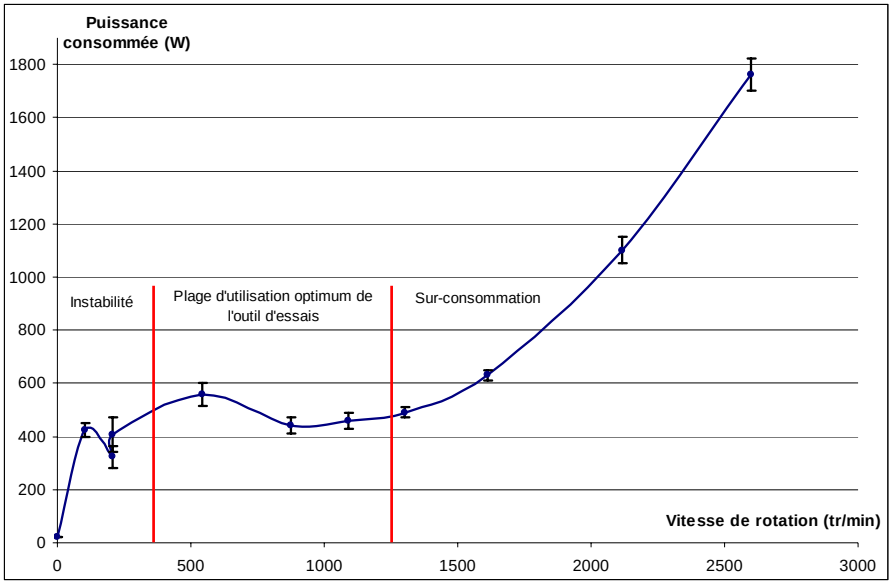


Figure 116 : Evolution de la puissance électrique consommée pour la rotation simple de l'outil

Nous avons fait tourner l'outil à différentes vitesses de rotation et nous avons mesuré la puissance électrique consommée par le moteur sans usinage (Figure 116). Le résultat est assez étonnant, à cause de différents facteurs externes (rendement mécanique des roulements, frottement turbulent avec l'air…), une plage optimum d'utilisation se dessine. Pour des vitesses de rotation inférieures à cette plage (moins de 300tr/min), la puissance varie fortement ce qui est signe d'instabilité, à cause des frottements de l'air. Pour des vitesses de rotation supérieures à 1500 tr/min, nous assistons à une montée rapide de la consommation électrique.

Pour chacune des courbes que nous avons obtenues, nous avons noté et calculer une série de paramètres (Figure 117):

- La puissance maximale en Watt (MAX)
- La valeur minimale correspondant à la puissance à vide en Watt (MIN)
- La durée de l'usinage en secondes (T)
- La consommation électrique totale en Joules (E)
- La quantité de bois transformé en cm^3 (V)
- Le travail spécifique par seconde généré par l'usinage de la branche en W/cm3 (K)

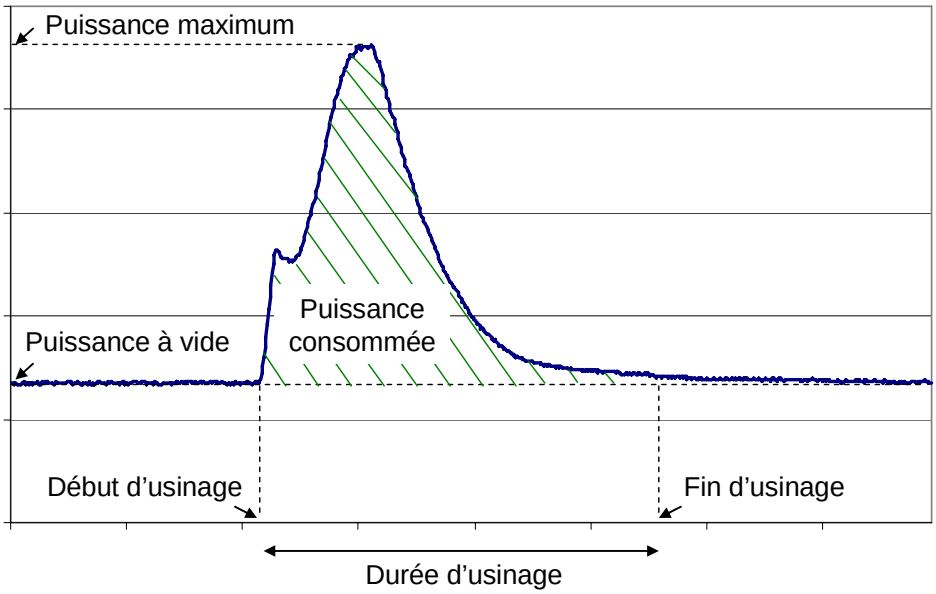


Figure 117 : Description des critères de traitement d'un signal de puissance

Durant le projet de recherche nous avons tenté de mesurer les efforts de coupe réels suivant trois axes plutôt que la puissance électrique au moyen d'une chaîne d'acquisition d'efforts de coupe. Nous avons du revoir nos espérances à la baisse pour plusieurs raisons : tout d'abord, plus qu'un effort axial, la platine devait mesurer un effort de torsion au niveau de la fixation de la branche sur l'axe magnétique d'amenage. La platine que nous possédions n'en était pas capable. La deuxième raison est la difficulté d'intégrer les mouvements vibratoires de la branche lors de l'usinage. (Ex : Figure 118).

5.2.2.2 Observations de coupe par caméra

La caméra positionnée au dessus de l'outil lors de la coupe permet de filmer l'usinage d'un bout à l'autre. Grâce à la vidéo, nous sommes capables de voir comment se déroule l'usinage: si la branche vibre beaucoup, si elle s'efface sur l'outil, comment sont récupérés les copeaux…

Figure 118 : Décomposé de la coupe d'une branche pris par caméra

Sur la Figure 118, nous avons peint l'extrémité de la branche pour plus de visibilité. C'est grâce à ce type de décomposition que l'on s'aperçoit de la difficulté à couper des éléments flexibles. Nous pouvons observer deux choses très importantes qui seront observées pour chacun des essais :

- L'effacement de la branche (ou retrait) : il s'agit de l'angle que prend la branche encastrée dans le chariot d'amenage, dû à l'action de l'outil sur celle-ci (Figure 119).

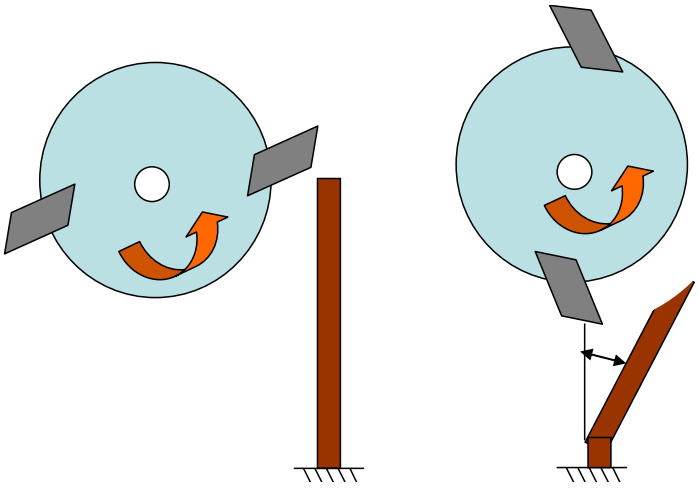


Figure 119 : Représentation de l'angle d'effacement de la branche devant l'outil

- La vibration de la branche : à cause de la faible vitesse de la caméra, lorsque la branche vibre rapidement, l'image qui en ressort représente une branche floue. Comme nous l'avons dit précédemment, le début de l'usinage favorise la traction de la branche (branche nette) alors que la seconde partie accentue la composante radiale de l'effort de coupe ce qui provoque une oscillation de la branche (branche floue). Ainsi, en visionnant les différentes images de l'usinage, nous pouvons voir quelles sont les branches qui vibrent sous l'effet de l'outil et celles qui vibrent moins. Ces observations ne peuvent pas donner lieu à des conclusions fermes car il est impossible d'apprécier le flou de la caméra, elles restent donc à l'état d'observations.

5.3 Observations et résultats expérimentaux

Lors de l'usinage des premières branches, il a tout d'abord été question d'observer comment se déroulait l'usinage : la tenue de la branche, les vibrations que cela entraînait (bruit), le comportement des copeaux. Ce paragraphe ayant pour but de connaître les paramètres de coupe optimum pour notre outil, il retrace les réflexions qui ont permis d'écarter certains paramètres de coupe au profit d'autres. Ces observations ont donc permis d'explorer les possibilités de l'outil et de préparer la conception d'un prototype grandeur nature : le prototype industriel.

5.3.1 Capacité de coupe, vitesse de rotation

5.3.1.1 Capacité de travail de l'outil

La principale caractéristique distinguant une branche d'une autre sera son diamètre sur le plan de coupe. Comme nous l'avons dit, nous avons choisi des branches dont le diamètre était inférieur à 5 cm (paragraphe 5.1.2.1). Parmi ces branches nous pouvons distinguer trois classes de diamètres approximatifs sur le plan de coupe :

- Gros : supérieur à 40mm
- Moyen : entre 15 et 40mm
- Petit : moins de 15mm

Ces trois types de branches, d'âges et de maturités quelque peu différents, se comportent de façons très différentes face à l'outil. Il est important de définir la capacité de travail d'un outil, c'est-à-dire sa capacité à faire son travail dans le temps que l'on lui a imparti. Cette notion n'a pas besoin d'être définie dans l'usinage bois classique car la pièce de bois à usiner est maintenue par la main de l'ouvrier ou par des rouleaux ameneurs. Quand la capacité de travail de l'outil est trop faible pour l'usinage demandé, des conséquences apparaissent tout naturellement : mauvais état de surface, vitesse d'amenage diminuée en temps réel… Dans notre cas d'usinage, lorsque l'outil rencontre une branche trop grosse trop rapidement, la branche se cabre autour de l'outil, se plie contre celui-ci et la branche n'est pas correctement usinée (Figure 119 et). Ce cas arrive régulièrement avec des branches de gros diamètres à des vitesses d'avances trop élevées (1.5 et 3 km/h) (Figure 120).

Figure 120 : Etat de surface d'une branche de 30mm de diamètre de coupe amenée à 3km/h et coupée à 400 tr/min.

Par contre, il est tout à fait possible, avec des conditions d'usinage correctes, d'obtenir un excellent état de surface pour des branches de gros diamètres (Figure 121).

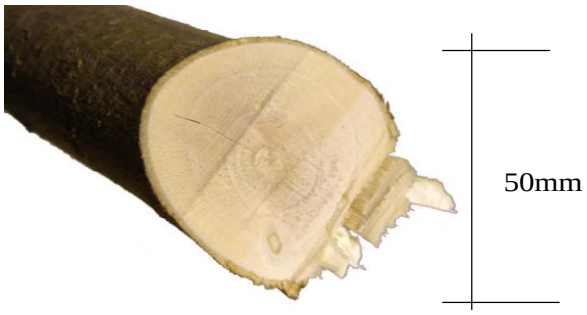


Figure 121 : Etat de surface d'une branche de 50mm de diamètre amenée à 0.5km/h et coupée à 800tr/min

Pour les petites branches, moins de 10mm de diamètre sur le plan de coupe, n'ont que deux possibilités: soit l'outil est correctement affûté et coupe net la branche et l'usinage se passe bien, soit l'outil est moins bien affûté ou il tourne trop lentement et la petite branche ne résiste pas suffisamment à l'action de la dent et sautille sur celle-ci et n'est pas correctement coupée.

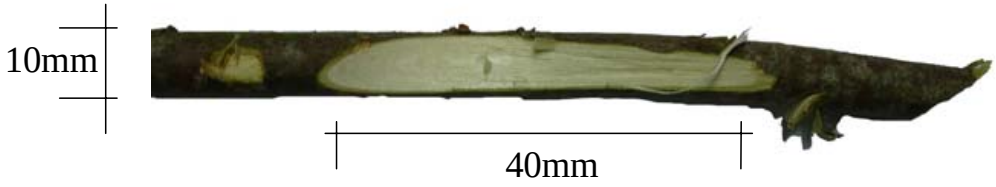


Figure 122 : Etat de surface d'une branche de 10mm de diamètre amenée à 3km/h et coupée à 400tr/min

Notons également l'influence des constituants physiques de la matière ligneuse : la présence de singularités (nœuds, bois de tension…) influence les caractéristiques mécaniques de la branche, modifient la tenue de celle-ci face à l'outil. Après observations, la présence de nœuds peut provoquer deux réactions : soit le nœud complet part et nous formons un gros projectile, soit il reste et la branche est mal coupée :

Figure 123 : A gauche, le détachement du nœud complet et à droite, la coupe correcte de la branche du bas (la deuxième à être coupée) et l'éclatement de la première à être coupée.

5.3.1.2 Cas particulier de l'usinage à 400tr/min

Si nous prenons le cas particulier de l'usinage à 400tr/min, nous nous apercevons que ce cas est la parfaite illustration de ce qui est décrit précédemment. En effet, dans ce cas là, et pour tous les autres paramètres d'usinage, l'outil n'était pas capable de couper des branches de plus de 20mm de diamètre. Si la branche est trop grosse, l'outil ne possède pas la capacité de travail suffisante et ne parvient pas à couper la branche. Le résultat peut être désastreux. C'est pourquoi, nous avons décidé d'annuler la vitesse de rotation de 400tr/min ainsi que tous les essais liés à cette vitesse.

5.3.1.3 Tableau récapitulatif

Le tableau suivant met en évidence les précautions à prendre quant à la capacité de travail de l'outil. Pour chaque vitesse de rotation et chaque vitesse d'avance nous nous plaçons dans un cas de charge de l'outil. Dans ce cas de charge, soit l'outil accepte l'usinage sans soucis particulier, soit l'usinage se passe mal : trop grosses vibrations, branches non coupées, casse du banc d'essais… Le tableau présente les diamètres de branches et les angles pour lesquels je préconise l'utilisation de l'outil. Nous voyons par exemple que toutes les branches ne sont pas utilisables pour une vitesse de rotation et une vitesse d'avance données. A 800tr/min et à 1.5km/h, je préconise l'utilisation de toutes branches <50mm pour un angle de coupe de 55°et 40° et les branches <30mm pour un angle de 25°. Il s'agit bien sûr d'estimations basées sur des observations.

	0,5km/h	**1km/h**	**1,5km/h**
400tr/min	branches<30mm avec un angle de 55° et branches<20mm avec angle de 40°	branches<20mm avec un angle de 55°	branches<10mm avec un angle de 55°
800tr/min	Toutes branches, tous angles	Toutes branches pour angles de 55° et 40°. Branches <40mm pour angle de 25°	Toutes branches pour angles de 55° et 40°. Branches <30mm pour angle de 25°
1200tr/min	Toutes branches, tous angles	Toutes branches, tous angles	Toutes branches pour angles de 55° et 40°. Branches <30mm pour angle de 25°

Figure 124 : Tableau récapitulatif des préconisations d'utilisation de l'outil.

5.3.2 Observations granulométriques

Suite du chapitre 2.5.2, nous savons que les conditions limites sont les suivantes : pas trop de particules fines (taux massique inférieur à 2%) pour la qualité de combustion et pas trop de grosses particules (l'une des dimensions ne doit pas excéder 5 cm et 3cm pour les autres) à cause des risques de bourrage avec les vis d'entraînement. Afin de maîtriser le flux de bois entrant dans le foyer de la chaudière, il est également nécessaire d'avoir une taille de plaquettes homogène : c'est-à-dire une forte

proportion de plaquettes comprises entre 10 et 50mm. Nous cherchons donc à établir le domaine d'utilisation de l'outil avec le critère de la taille des plaquettes produites. Chacune des mesures granulométriques a été faite sur un essai de trois branches.

5.3.2.1 Influence de la fréquence de rotation

Nous retrouvons, sur les résultats de granulométrie, le concept d'épaisseur de copeaux. La logique voudrait que l'augmentation de la fréquence de passage de dents ou celle de la branche devant ces dents, fasse diminuer la taille globale des plaquettes (Figure 125).

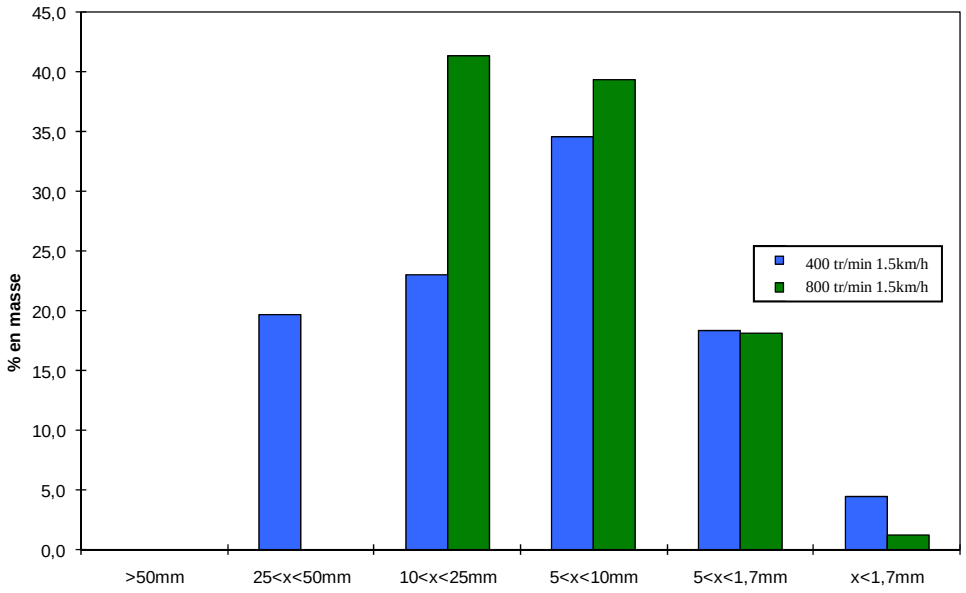


Figure 125 : Comparaison granulométrique entre un usinage à 400 tr/min et à 800tr/min

Les résultats sont clairs, la granulométrie à 800tr/min met en évidence la présence d'une proportion plus importante de petites particules. Pour l'usinage à 400 tr/min, les dents passent moins souvent pour couper la branche, les produits sont donc plus gros. Néanmoins les deux courbes sont critiquables pour deux raisons : la bleue présente un taux important de fines (5%), moins de 2% pour l'autre, et les tailles ne sont pas homogènes (beaucoup de tailles différentes). La verte, même si elle offre une homogénéité plus importante, montre la présence de particules un peu trop petites.

5.3.2.2 Influence de la vitesse d'avance

Etudions maintenant l'influence de la vitesse d'avance de la branche sur l'outil. Les conditions d'essais sont les mêmes que précédemment mais avec une vitesse d'avance lente (0.5 km/h) et une plus rapide (1.5 km/h) (Figure 126). Ici encore la granulométrie révèle une variation globale de la taille des plaquettes à cause de la variation de la vitesse d'avance. Avec une vitesse d'avance lente, la taille globale des plaquettes est nettement plus petite et en plus le taux de fines est important (presque 20%). La présence d'un fort taux de grosses plaquettes est due au détachage de grosses particules

pendant l'usinage, cela nous montre que parfois les branches ne s'usinent pas toujours comme l'on a prévu. La granulométrie avec une vitesse d'avance plus élevée offre une tendance nettement plus homogène, la part de plaquettes de taille moyenne étant importante. Nous sommes en face d'une répartition gaussienne.

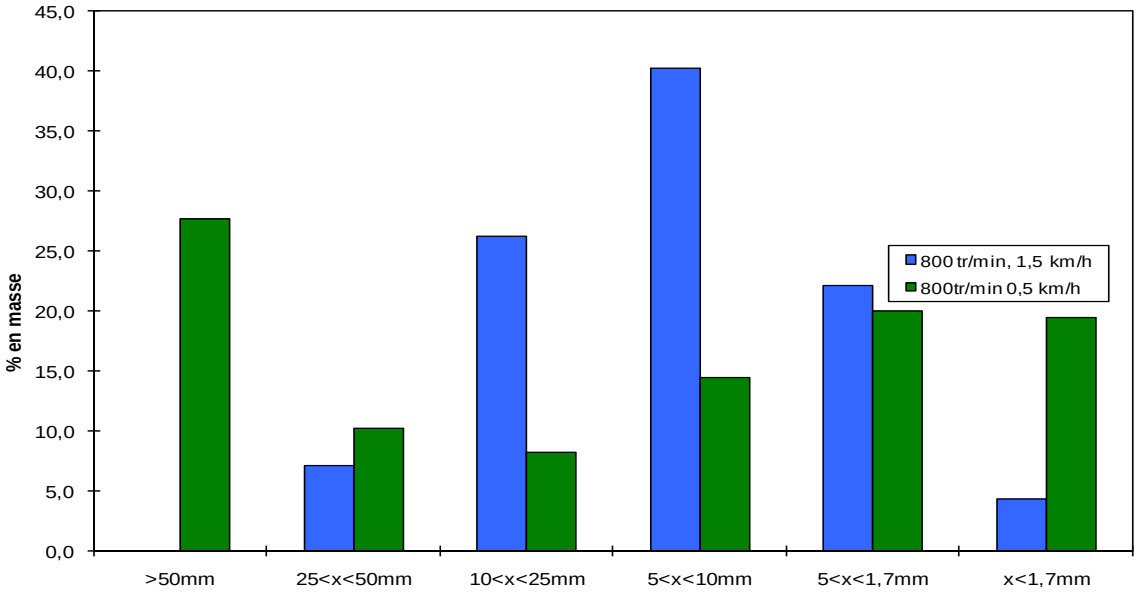


Figure 126 : Comparaison granulométrique de deux usinages identiques avec deux vitesses d'avance différentes

5.3.2.3 Influence de l'angle de coupe

Le dernier test pratiqué, sur la granulométrie, est l'influence de l'angle de coupe des couteaux : deux essais de coupe ont été comparés : 800tr/min, 6 couteaux, 1.5km/h mais avec deux angles de coupe différents : 25° et 55°.

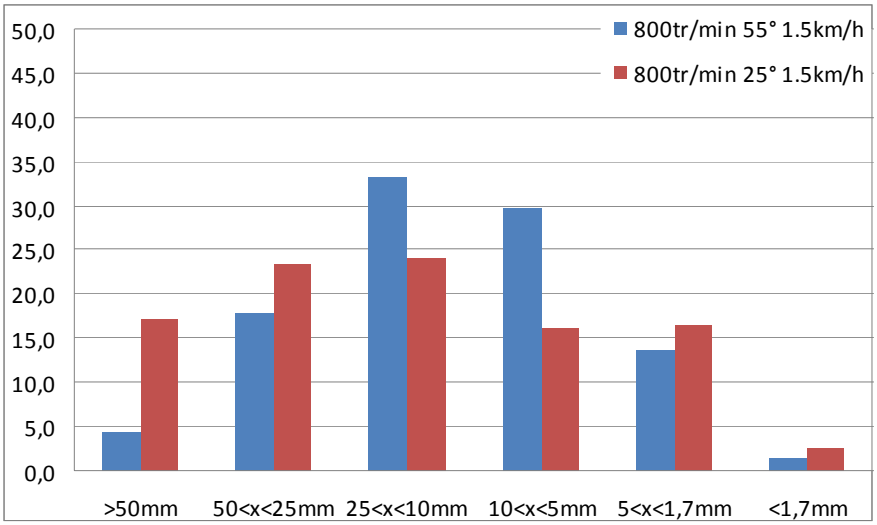


Figure 127 : Répartition granulométrique de deux usinages identiques avec deux angles de coupe différents.

La comparaison granulométrique de ce test montre une homogénéité plus importante pour l'angle de coupe de 55° (presque 65% des plaquettes sont entre 5 et 25mm). L'angle de 25° produit des plaquettes de tailles plus diverses (aucun pourcentage ne dépasse les 25%). L'explication de ces résultats fait intervenir un paramètres nouveau : l'épaisseur de la plaquette, conditionnée par la pénétration de l'arête de coupe dans la branche. En dehors du fait que l'angle de 25° donne une composante radiale d'efforts de coupe importante ce qui repousse la branche au moment de l'usinage, celui-ci réduit la pénétration de l'arête de coupe dans le bois ce qui provoque des épaisseurs de plaquettes faibles : 2mm maximum pour cet essai. L'angle de 55° autorise une bonne pénétration de l'arête de coupe dans la branche donc une épaisseur de plaquette supérieure (environ 5mm en moyenne). Dans le cas du 25° nous formons donc davantage de copeaux de type II alors que l'angle de 55° favorise la formation de copeaux de type I, plus épais. La diversité de tailles de plaquettes pour le 25° s'explique donc simplement par une fragilisation de la plaquette due à sa faible épaisseur et donc à une fragmentation. L'angle de 40° se comporte de façon intermédiaire, mélangeant un peu les types de copeaux et donc les granulométries.

Figure 128 : Copeaux de TYPE I formé avec un angle de coupe de 55° (à gauche) et de TYPE II avec 25° (à droite)

Notons également un phénomène important : l'utilisation d'un angle de coupe important, favorisant le détachage de copeau de grosse taille, provoque le deuxième mode de formation des plaquettes en déchiquetage : le fendage (paragraphe 3.2.1.3). Ce mode de formation n'apparaît que lors de l'utilisation de l'angle de coupe de 55° et ce phénomène montre que nous sommes dans les mêmes conditions de formation des plaquettes qu'un canter ou un broyeur : tout d'abord une action de l'arête de coupe sur la matière, puis une fissuration et une séparation des plaquettes dépendante de la cohésion du bois.

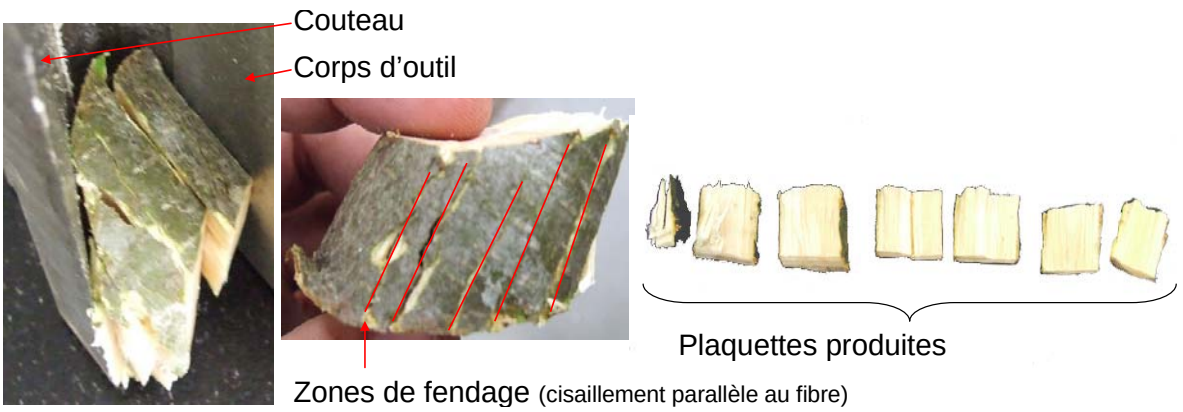


Figure 129 : photos représentant la formation de plaquettes par fendage, effectué à 400tr/min, angle de coupe de 55°, avance 1.5km/h

5.3.2.4 Conclusion des mesures granulométriques

Grâce à la mesure granulométrique, nous avons pu voir que l'usinage généré par l'outil de laboratoire se comportait sous l'influence des mêmes paramètres de coupe que dans l'usinage bois traditionnel. En effet, l'angle de coupe conditionne la pénétration de l'arête de coupe de l'outil dans la branche et donc la formation de la plaquette, un angle important (55°) favorisera un effort de traction dans la branche, et donc sa tenue face à la coupe, et également une bonne entrée de l'arête dans la matière, favorisant ainsi la formation de copeaux de type I, incontournables pour l'utilisation des plaquettes en chauffage. Le couple {vitesse de rotation - vitesse d'amenage} détermine, quant à lui la capacité de coupe de l'outil et la longueur des plaquettes produites. Une vitesse de 800tr/min semble suffisante pour faire de la bonne plaquette et un amenage de 1,5km/h semble laisser suffisamment de temps à la formation des plaquettes. Nous l'avons également vu, cette vitesse de rotation n'est pas gourmande en énergie.

5.3.3 Résultats de mesures de puissances

Examinons désormais l'effet de la variation des paramètres de coupe sur la puissance électrique consommée par l'usinage des branches. Ce critère est aussi important que la qualité des plaquettes produites car il rentre dans la volonté de l'entreprise NOREMAT de réduire les coûts d'utilisation de ses machines.

5.3.3.1 Influence de la vitesse d'amenage

La vitesse d'amenage de la branche n'influence pas la puissance consommée par rapport à son niveau mais par rapport à sa durée. Un usinage avec une vitesse d'amenage plus faible ne modifiera pas la puissance maximum atteinte (MAX), mais simplement la durée de consommation de puissance (T). La Figure 130 présente, pour chaque vitesse d'amenage, la valeur minimum, la valeur maximum et la moyenne de la puissance consommée sur les 15 essais (45 branches de diamètres variables).

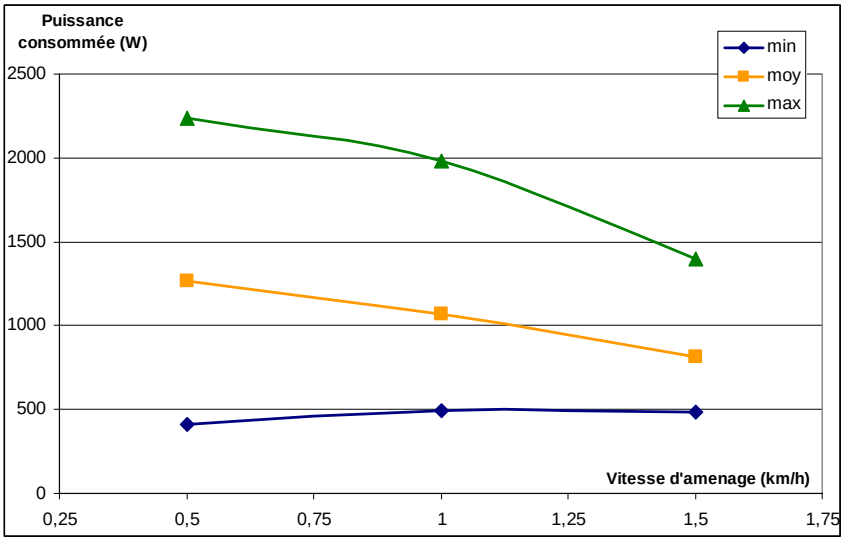


Figure 130 : Puissance consommée de tous les tests en fonction de la vitesse d'amenage

Sur ce graphique, nous voyons que la vitesse d'amenage n'a que peu d'influence sur la consommation d'énergie électrique et aura même tendance à la faire baisser. Cette légère baisse vient certainement de l'inertie de l'outil. A faible vitesse, l'outil a le temps de perdre de la vitesse et doit donc consommer de l'énergie pour la reprendre ce qui ne se produit pas à grande vitesse. Ce phénomène sera moins fréquent lors de la coupe en continue sur chantier. Nous pouvons également observer une diminution de l'écartement des trois courbes, ce qui signifie que la puissance consommée devient plus homogène avec l'augmentation de la vitesse d'avance.

5.3.3.2 Influence de la fréquence de rotation

La vitesse de rotation influence deux consommations de puissance : la puissance à vide et la puissance maximale. Naturellement, le fait de tourner plus vite à vide augmente la consommation de puissance à vide de l'outil mais également l'inertie de celui-ci, ce qui peut réduire la consommation globale d'énergie (Figure 131). Comme nous le voyons sur le graphique, la puissance à vide de l'outil a augmenté de 200W environ pour une augmentation de la vitesse de rotation de 400tr/min. Néanmoins, la consommation de puissance pour l'usinage de la branche de 3cm de diamètre n'est que de 820W contre 977W pour l'essai à 800tr/min. C'est pourquoi, l'augmentation de la vitesse de coupe à vide n'est pas toujours synonyme de consommation mais peut améliorer de façon significative la coupe, car on sait désormais que l'augmentation de la vitesse de rotation améliore la formation de la plaquette (paragraphe 5.3.2.1) et la capacité de coupe de l'outil (paragraphe 5.3.1.1).

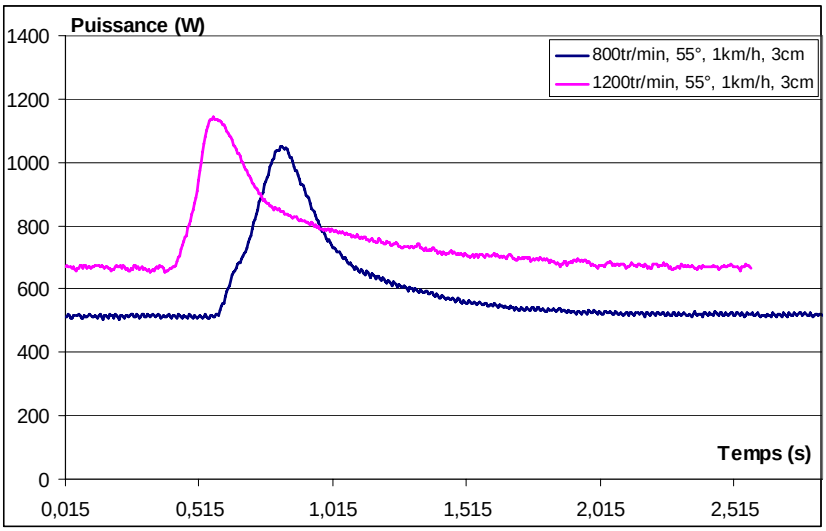


Figure 131 : Evolution de la puissance électrique consommée pour deux usinages aux conditions identiques mais avec une vitesse de rotation différente

5.3.3.3 Influence de l'angle de coupe

Nous avons observé le travail spécifique obtenu pour les trois angles de coupe (Figure 132), les mesures tiennent compte du minimum, maximum et moyenne des 15 essais. L'angle de coupe possède une influence importante sur l'énergie de coupe. On note que l'écart entre la valeur maximum et la valeur minimum a un coefficient 4 et que, en moyenne, les valeurs vont du simple au double. Nous l'avons vu précédemment, l'angle de coupe de 55° était le plus adapté pour la formation de bonnes plaquettes, nous le voyons ici, c'est également le meilleur choix pour la consommation de puissance.

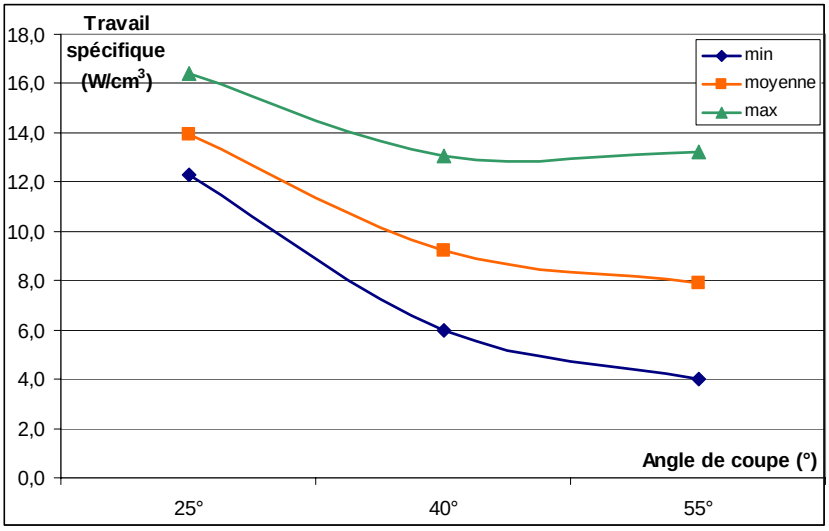


Figure 132 : Travail spécifique mesuré sur tous les essais en fonction de l'angle de coupe des couteaux

5.3.3.4 *Influence de la branche*

Le paramètre principal pour les branches est le diamètre au niveau de la coupe. La Figure 133 montre pour deux angles de coupe, 55° et 40° (25° n'ayant pas assez de données), l'évolution de la puissance consommée avec le diamètre de la branche au niveau de la coupe. On remarque que l'angle de coupe de 40° convient mieux que le 55° pour des branches d'un diamètre inférieur à 2.2cm environ. Ce phénomène s'explique par le fait que l'angle de 40° autorise le sectionnement de la petite branche d'un seul coup (faible consommation). Par contre, avec un angle de 55°, la petite branche peut s'effacer devant la dent et la coupe de la branche peut prendre plusieurs passages de dents (consommation plus forte). Pour le reste de la plage de diamètre, l'angle de 55° reste le meilleur en gardant une progression de la puissance avec le diamètre plus faible.

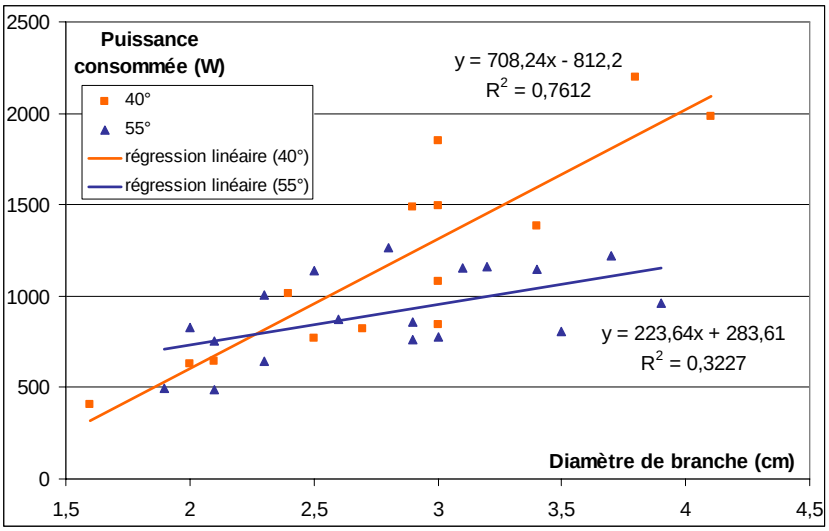


Figure 133 : Puissance consommée en fonction du diamètre de coupe pour deux angles de coupe

5.3.4 Résultats d'observations de coupe

5.3.4.1 *Influence de la vitesse d'amenage*

La vitesse d'amenage n'a, pour ainsi dire, pas d'effet sur l'effacement des branches devant l'outil (paragraphe 5.2.2.2). Sur le graphique suivant, il n'est pas possible de trouver de relations particulières entre ces deux paramètres. Les courbes sont très contrastées, la moyenne est constante et égale à 5° mais l'écart type est trop important pour trouver une tendance : environ 4. La principale raison de cette diversité est le comportement naturel de la branche face à l'outil avec tous les facteurs impliqués : diamètre, ramification, conditions de pousse…On retiendra simplement que les retraits à la vitesse de 1km/h sont moins diversifiés qu'avec les autres vitesses.

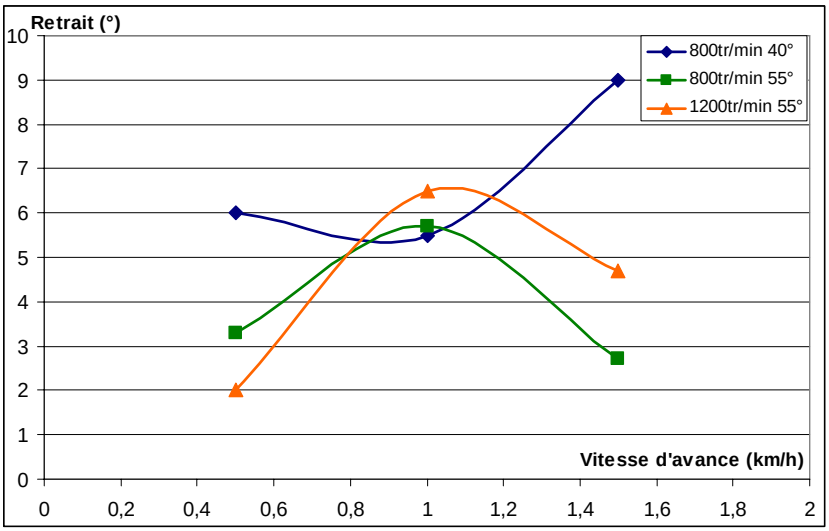


Figure 134 : Evolution du retrait des branches en fonction de la vitesse d'avance pour trois essais différents

Nous avons également mesuré le retrait pour tous les diamètres de branches et toutes les vitesses de rotation mais ces deux paramètres n'ont pas plus d'influence que la vitesse d'avance.

5.3.4.2 Influence de l'angle de coupe

Nous l'avons évoqué lors de l'étude bibliographique (paragraphe 3.1.9.1), cela se vérifie par l'expérience : l'angle de coupe possède une influence non négligeable sur le comportement de la branche face à l'outil. Les angles de coupe faibles favorisent une composante radiale importante et donc repousse la branche lors de la coupe. Pour les angles importants (55°), le phénomène inverse se produit et les efforts longitudinaux importants mettent la branche en traction et la stabilisent.

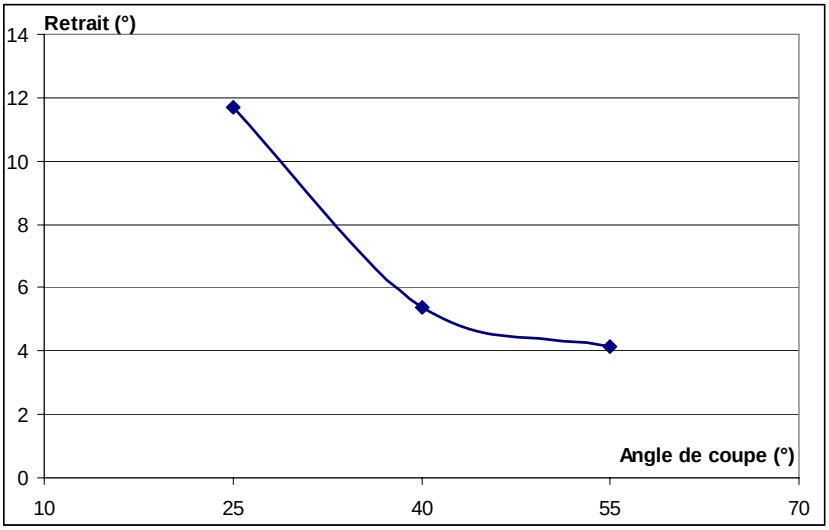


Figure 135 : Evolution du retrait de la branche face à l'outil en fonction de l'angle de coupe, moyenne effectuée sur toutes les mesures

La Figure 135 montre une nette diminution du retrait de la branche avec l'augmentation de l'angle de coupe, graphique obtenu avec les 15 essais (45 branches). Cette diminution du retrait est sans doute à mettre en relation avec la diminution de la puissance électrique (Figure 132).

5.3.5 Observations diverses

5.3.5.1 Fissurations du bout de certaines branches

Il peut arriver que certaines branches fissurent en bout pendant le passage de l'outil, en fin d'usinage. En effet, pendant la phase finale de l'usinage, les dents attaquent la branche suivant le mode de coupe A et provoquent ainsi des vibrations importantes.

Figure 136 : Exemple de fissuration en bout de branche

Cette fissuration apparaît généralement lorsque les conditions de coupe sont mauvaises (angle d'attaque trop faible ou capacité de coupe de l'outil dépassée). Ces fissurations sont bien évidemment à éviter car elles sont responsables de la formation de plaquettes non maîtrisées et d'un mauvais état de surface de la branche.

5.3.5.2 Types de copeaux

L'usinage effectué en laboratoire à ceci d'intéressant qu'il reprend les mêmes principes de coupe que l'usinage classique mais à des échelles différentes. Ainsi il est possible de facilement observer la formation des copeaux. Nous avons séparé en trois la zone de projection des copeaux et avons noté le type de copeau formé pour chaque zone. Attention, ceci est la représentation d'une tendance observée sur quelques branches (3). D'une façon générale, le copeau de type I est largement prépondérant par rapport aux autres types.

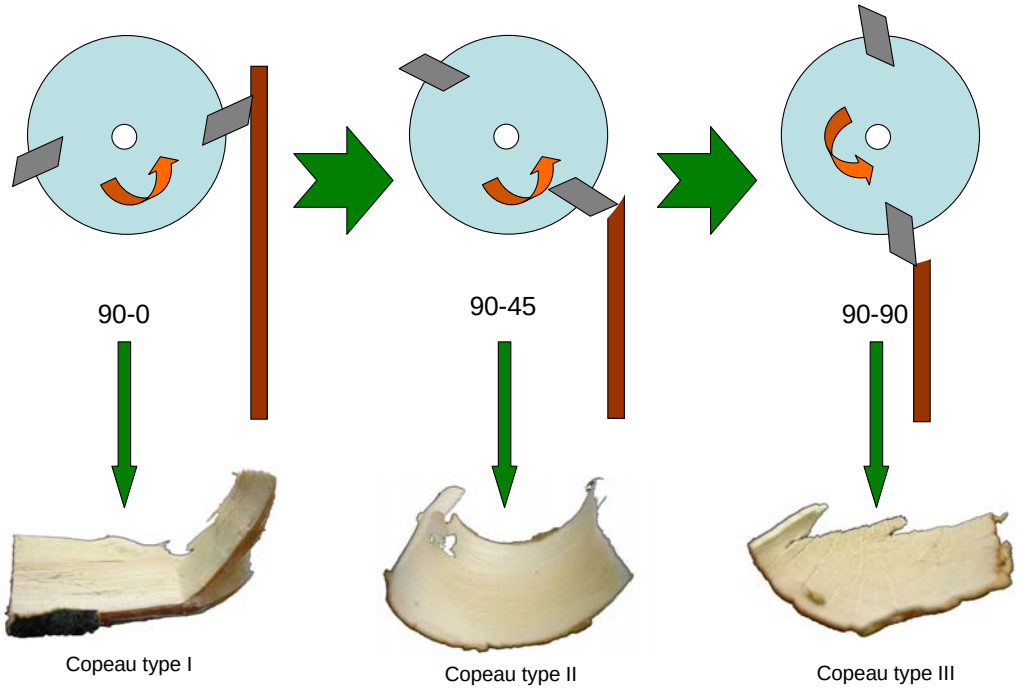


Figure 137 : Types de copeaux rencontrés durant les différentes étapes de l'usinage d'une branche

5.4 Conclusions

5.4.1 Validation du principe de fonctionnement

L'outil de laboratoire avait pour principal but de valider le principe de coupe de branche avec ce type de configuration et de trouver les meilleurs paramètres de coupe pour une bonne coupe des branches et une bonne formation de plaquettes. Le résultat est des plus concluants : l'outil est capable, sous certaines conditions, de couper correctement une branche et de la transformer en plaquettes de chauffage de dimensions correctes. Nous nous sommes également aperçu que cette transformation pouvait s'effectuer à des vitesses relativement faibles (aux alentours de 1000 tr/min) et en utilisant des puissances raisonnables (1000W en moyenne). Grâce à un choix judicieux de l'angle de coupe (55°), de la vitesse de rotation (800-1200tr/min), de la vitesse d'avance (1-1.5km/h), une majorité de copeaux de type I de forte épaisseur est formée, alliant le phénomène de tranchage à celui de fendage.

5.4.2 Principes de coupe retenus

5.4.2.1 Passage de dents

Parmi les précédents résultats, il est apparu que la fréquence de passage de dents devait être comprise entre 60 et 80 passages par seconde. Le passage de dent par seconde permet de réunir deux paramètres que sont le nombre de dents et la vitesse de rotation. En effet, c'est la fréquence de passage de dent qui va conditionner l'épaisseur et donc la longueur de la plaquette formée. Ce passage de dents correspond à des vitesses de rotation comprises entre 1000 et 1200tr/min.

5.4.2.2 Angle de coupe

Les essais de coupe avec les trois angles de coupe (25°, 40° et 55°) nous ont montré qu'ils avaient une importance capitale. En effet, l'angle de coupe modifie la répartition normale et tangentielle des efforts de coupe. De ce fait, la réaction de la branche s'en trouve changée (Figure 138). En augmentant l'effort tangentiel (Ft) la branche rentre en traction et résiste mieux à l'attaque normale de l'arête de coupe. Par contre, en forçant l'effort normal (Fn), la branche fuit devant l'arête de coupe et sautille sur l'outil et il en ressort une mauvaise coupe et une production de plaquettes de mauvaise qualité. L'angle de coupe de 55° est donc validé.

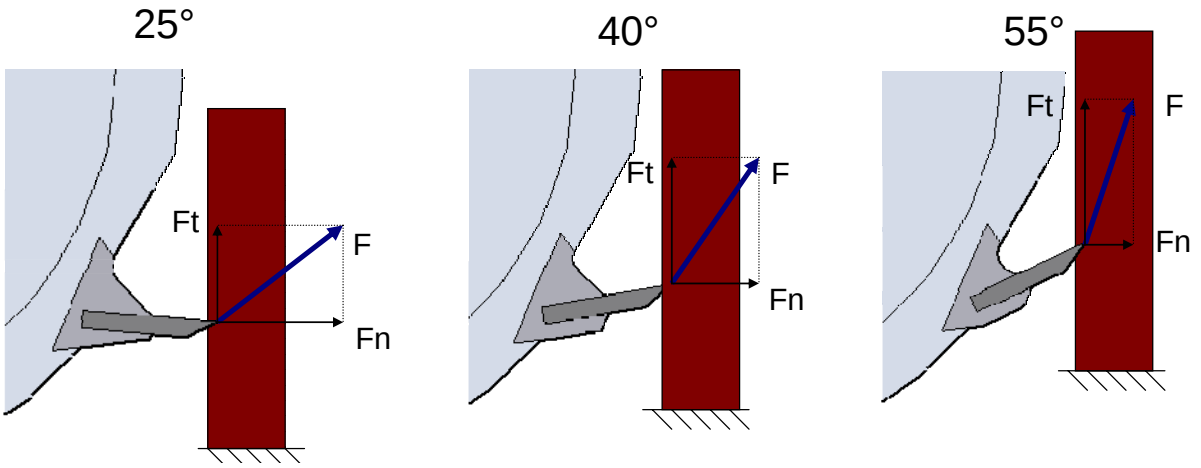


Figure 138 : Variation de la direction d'effort de coupe en fonction de l'angle d'attaque

5.4.2.3 Récupération des copeaux produits

Pour la récupération, la théorie a des difficultés à rejoindre la pratique. Lors de la coupe, les copeaux ne suivent pas toujours la tangente du cercle de coupe et l'aspiration ne permet pas toujours leur récupération. Dans la réalité, lors de la première rencontre de la branche sur l'outil, les premiers copeaux, de grosses tailles, sont évacués dans l'axe de la branche et les derniers partent de façon perpendiculaire. Nous avons donc un champ d'évacuation des copeaux de 120° sur l'usinage complet. Cette question de la projection des copeaux est primordiale pour le respect du cahier des charges de l'outil industriel.

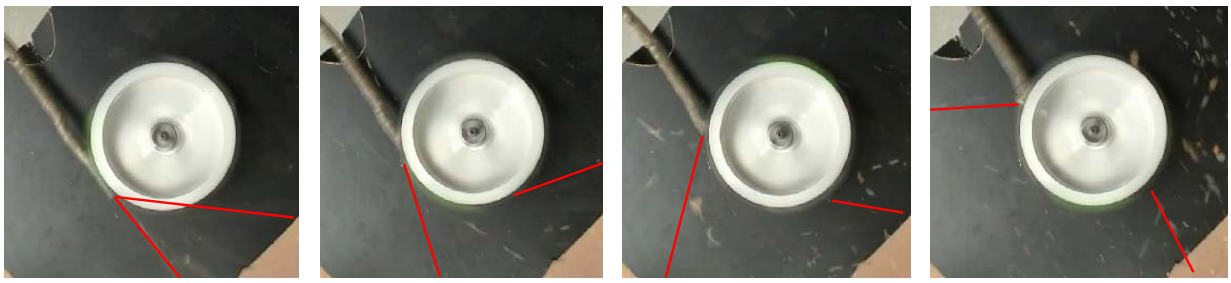


Figure 139 : Evolution de la projection des copeaux lors d'un usinage (ex : 800tr/min, 1km/h)

Chapitre 6. VALIDATION DU CONCEPT DE COUPE PAR PROTOTYPAGE INDUSTRIEL ET ESSAIS

A la suite des essais avec le prototype de laboratoire, nous devons désormais poursuivre les essais avec un outil grandeur nature, dans des conditions réelles de chantier d'élagage. En utilisant les enseignements tirés des essais en laboratoire, nous reprenons la conception de ce nouvel outil en vue de son montage sur un bras hydraulique NOREMAT et un porteur.

6.1 Présentation du prototype

6.1.1 Cahier des charges

L'Outil de coupe prototype Grandeur Nature (OGN), a pour but de réaliser une coupe dans les conditions réelles de chantier. Il doit également permettre la continuité des essais pour son amélioration. Sa fonction principale est donc d'entretenir des haies en condition réelle et poursuivre les tests. Nous reprenons le principe du précédent outil de laboratoire, à ceci près que la largeur de coupe devra être celle d'un chantier et que quelques modifications seront apportées (paragraphe 6.1.2). Il sera adapté sur une machine existante de NOREMAT et récupérera les plaquettes produits. Nous reprenons les dimensions générales de l'outil de laboratoire et les adaptons pour un matériel existant de la gamme NOREMAT.

Nous l'avons vu précédemment, la récupération des copeaux produits n'est pas chose aisée, d'autant plus que la largeur de coupe est désormais portée à 1m20. La solution est de capter le copeau au moment de sa fabrication, et de l'emmener directement au point de stockage de façon unitaire, ainsi nous pouvons éviter les bourrages, et l'agglomération de paquets de copeaux humides. Il a donc été décidé de le capter juste après sa formation. Nous l'avons vu lors des essais précédents, capter les copeaux à l'extérieur de l'outil est délicat en raison de l'angle de projection important. Nous avons du décider de les aspirer à l'intérieur du corps de l'outil, ce qui pourra limiter les projections. Ce système réellement innovant a besoin d'être validé sur chantier et permettra une optimisation de la captation des copeaux ainsi qu'un tri de la taille de ceux-ci. Le copeau, formé par l'arête de coupe, va se détacher et rentrer dans l'outil, puis sera évacuer.

L'objectif n'est pas encore de concevoir un groupe de broyage complet mais simplement un outil. Nous avons donc conçu un nouvel outil adaptable à une carcasse de groupe existante. Le choix de la carcasse existante s'est porté naturellement vers le FOREST BROYEUR car il présente la plus grande ouverture pour l'entrée des branches et une largeur de coupe raisonnable (1m25) (Figure 140).

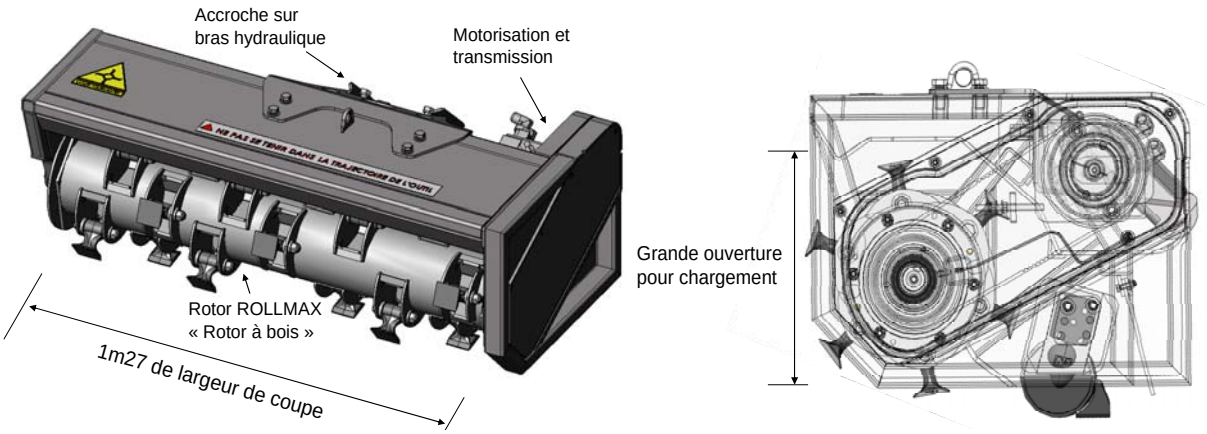


Figure 140 : Présentation du ROLL MAX (rotor actuellement utilisé) et du groupe FOREST BROYEUR de chez NOREMAT

Les conditions de coupe ont été validées lors des précédents essais en laboratoire et seront donc réutilisées pour cet outil. L'outil et le groupe supporteront des vitesses de rotation de 1500 tr/min maximum, pour une vitesse d'avance de 3 km/h.

Nous reprenons une fois encore les couteaux que nous avons utilisés précédemment : des couteaux droits en acier avec un angle de taillant de 30°. Ici encore, l'angle de coupe pourra être changé au moyen d'inserts. Pour cette campagne d'essais, il a été fixé à 55°. Comme nous ne souhaitons pas utiliser des couteaux de 1m25 de largeur de coupe, nous les avons morcelés en couteaux de 50mm.

Nous avons choisi de disposer ces couteaux selon une disposition hélicoïdale. Ce type de montage présente des avantages en terme d'efforts de coupe et de bruit (paragraphe 3.1.9.2), et permet également la réalisation d'ouverture dans le corps d'outil tout en maintenant la tenue de celui-ci. Ces ouvertures sont pour le passage des plaquettes à l'intérieur de l'outil. D'une façon plus générale, le tableau suivant récapitule les contraintes de l'outil.

Fonction principale	Fonctions contraintes	Critère	Niveaux	Flexibilités
Couper et broyer les branches	FC1: Respecter les proportions dimensionelles	Diamètre de coupe	430 mm	± 10%
		Hauteur de coupe	1250 mm	± 10%
		Couteaux grandeur nature		
	FC2: S'adapter aux conditions de coupe prévues	Vitesse de rotation	400-1200 tr/min	Max 1500 tr/min
		Vitesse d'avance	2 km/h	± 1 km/h
		Mode de travail	Opposition dans le sens anti horaire	
	FC3: Respecter les paramètres de coupe prévues	Couteaux de broyeurs		
		Matériau de coupe	Acier	
		Angle de coupe	α=55°	Sans
		Angle de taillant	β=30°	Sans
		Déport de dent important	20mm	Diamètre de coupe max= 480mm
Récuperer les produits broyés	FC4: Favoriser l'entrée des copeaux dans le corps d'outil	Présence de fenêtre sous les couteaux	dimensions 50*50mm	± 10%
	FC5: Les conserver à l'intérieur	Avoir un recouvrement du couteau suffisant	Moins de 20mm	± 10%
	FC6: Pouvoir les récuperer	Prévoir une trappe		
	FC7: Respecter les contraintes d'un engin embarqué			
	FC8: Etre sécurisé pour l'utilisateur et son environnement			

Figure 141 : Tableau d'analyse des contraintes de l'OGN

6.1.2 Présentation générale

Afin de respecter le cahier des charges précisé ci-dessus, nous avons conçu les différentes parties de l'outil en fonction des contraintes scientifiques (conditions de coupe, modularité de l'outil…) et des contraintes industrielles (machines existantes, coûts et délais…)

6.1.2.1 Corps de l'outil

Le corps d'outil se présente sous la forme d'un tube en acier de 10mm d'épaisseur dans lequel est percée une série de fenêtres permettant la fixation de l'ensemble {insert+couteau} et le passage des copeaux formés à l'intérieur. Le corps d'outil est volontairement creux, contrairement à l'outil de laboratoire pour des raisons de poids et pour faciliter l'évacuation des copeaux.

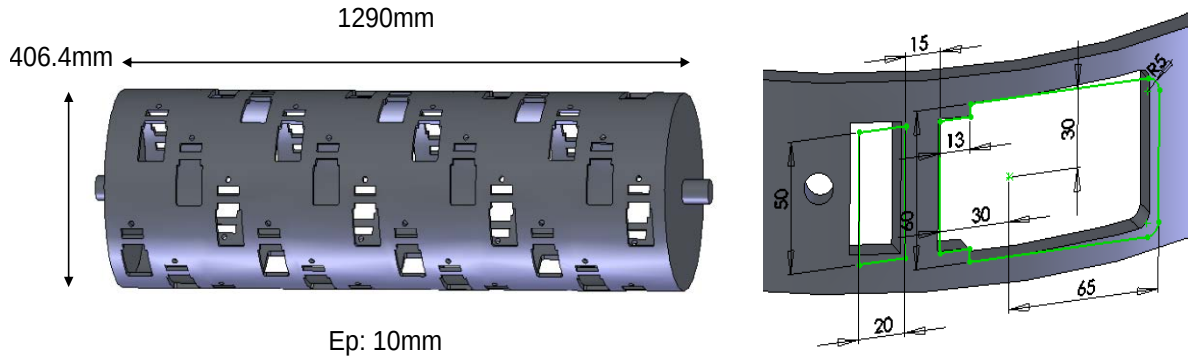


Figure 142 : à gauche, présentation des dimensions générales du corps d'outil et à droite, vue de détail d'une fenêtre

L'outil comprend 54 ouvertures, réparties sur 4 hélices. Chaque hélice effectue une révolution complète autour de l'outil et elles sont décalées les unes des autres pour assurer un recouvrement sur la surface de coupe (Figure 143). Ainsi chaque couteau suit deux autres répartis de part et d'autres et chevauchés de 5mm.

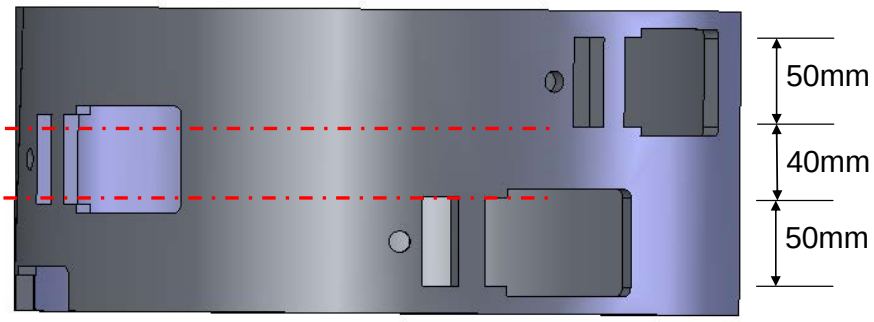


Figure 143 : Recouvrement des zones de coupe

6.1.2.2 Les couteaux

Les couteaux droits sont en aciers, très proches (dans la conception) de ceux de l'outil de laboratoire. Ils sont positionnés dans la fenêtre de telle manière à accompagner le copeau à l'intérieur de l'outil. Ils sont fixés sur les inserts par fixation mécanique. Ces couteaux, de conception volontairement simple afin d'effectuer les premiers essais (paragraphe 6.3.2.1), on du être modifié par la suite (paragraphe 6.3.2.2).

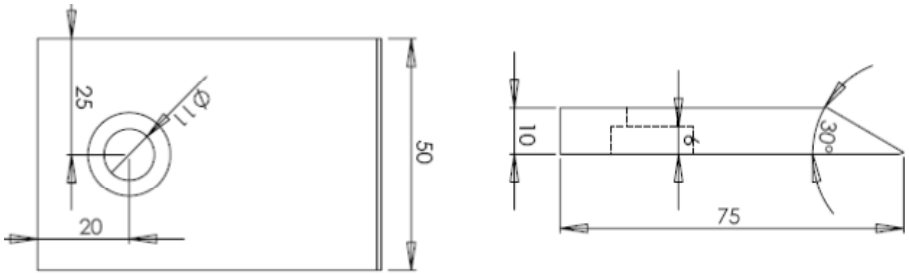


Figure 144 : Vue de dessous et de coté des couteaux droits utilisés

6.1.2.3 Inserts :

Les inserts assurent la liaison entre le corps d'outil et les couteaux en faisant varier l'angle de coupe de ces derniers, tout comme l'outil de laboratoire. Ils sont également fixés au corps d'outil par fixations mécaniques. Un espace a été aménagé afin de faciliter le passage du copeau. Plusieurs formes d'inserts ont été étudiées et soumises aux contraintes de poids, de coût d'usinage, de résistance mécanique…Le couteau est fixé sur l'insert par une vis CHC tête courte pour ne pas gêner le passage du copeau.

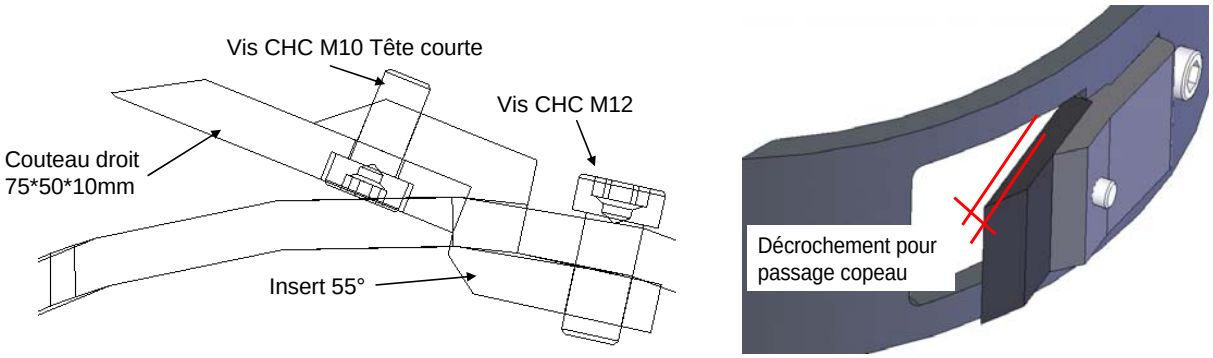


Figure 145 : Schéma de montage des couteaux par les inserts, vue de dessus (à gauche) et vue d'ensemble (à droite).

6.2 Etude mécanique

Tout comme l'outil de laboratoire, nous avons effectué une étude mécanique de l'outil en statique. Cela a permis de valider la tenue de celui-ci en rotation simple et en coupe. Pour cette étude deux types d'inserts ont été testés. Dans ce paragraphe nous vous présentons la version la plus résistante mécaniquement, mais est également la plus chère à fabriquer. La deuxième version a donc été fabriquée (Figure 145). La modélisation de la version fabriquée a également été faite mais de façon moins complète, c'est pour cette raison que la présentation de la modélisation est faite sur la première version. La tenue de la version fabriquée est encore meilleure que cette modélisation. Cette étude, tout comme celle de l'outil de laboratoire, ne se veut pas une modélisation complète d'un système mais simplement une vérification de sa tenue en rotation et en coupe.

Dans un premier temps, en rotation simple, l'ensemble {insert+couteau+vis} pèse 0.757kg, tourne à une vitesse de 32m/s (1500tr/min max) à une distance de 0.2m du centre de l'outil, soit une force centrifuge de 3900N agissant sur cet ensemble et orienté radialement à l'outil.

Lors de l'usinage, maintenant, l'effort de coupe vient s'ajouter à celui de la force centrifuge. Nous reprenons le calcul fait pour l'outil de laboratoire à savoir l'estimation de l'effort de coupe de Kivimaa et de Martin (paragraphe 4.4.2.2): F = 40+120e. Dans cette formule, e est l'épaisseur de copeaux en mm et F l'effort de coupe par cm de largeur de copeaux. Cette formule a été établie pour du hêtre à 12% d'humidité avec un outil usé à 50% et un angle d'attaque de 30°. Dans le cas d'une branche de 5cm de diamètre (largeur du couteau), l'effort de coupe s'élève à 3200N. Nous sommes désormais capables d'appliquer les charges calculées sur notre système (Figure 146).

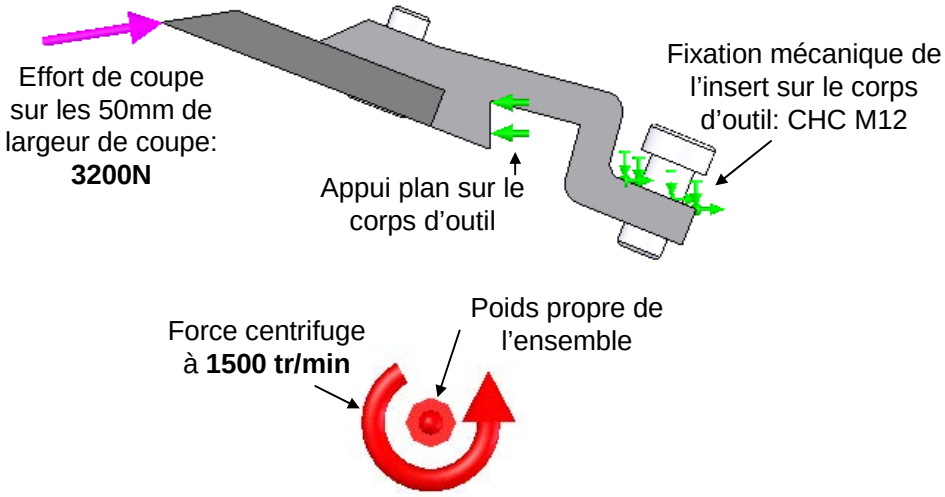


Figure 146 : Chargement du système lors de la coupe d'une branche

Une fois le calcul effectué, nous obtenons les résultats suivants :

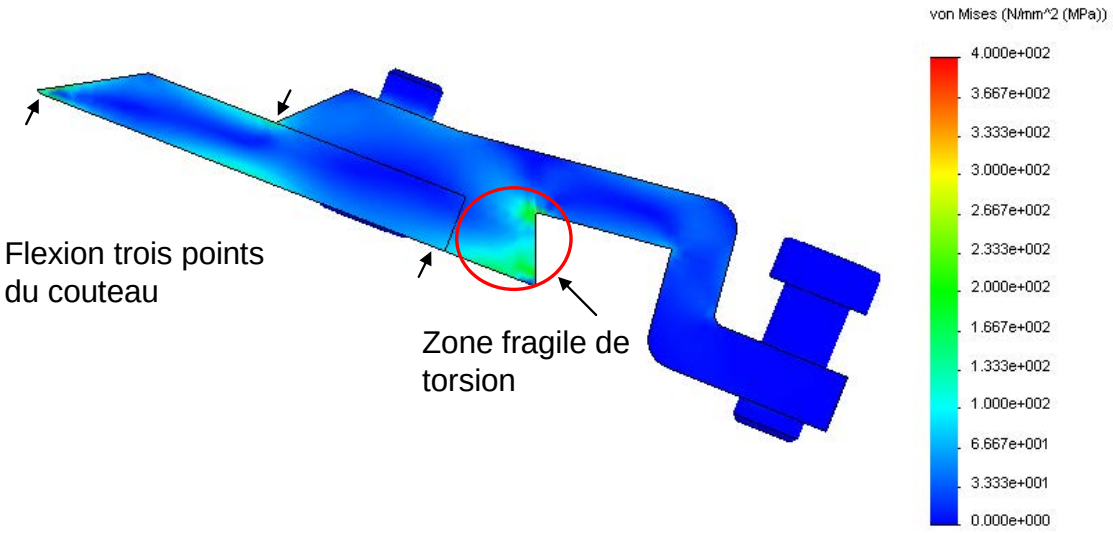


Figure 147 : Contraintes résultantes dans l'ensemble {couteau+insert+vis}

La limite élastique de l'acier que nous utilisons pour la fabrication des inserts et des couteaux se situe aux alentours de 400Mpa. Nous nous apercevons que l'ensemble tient à la vitesse de rotation et à l'usinage par le calcul statique. On distingue néanmoins une zone plus sollicitée sur le système qui est à surveiller.

Pour le corps d'outil, nous nous servons de la fonctionnalité de COSMOS qui peut nous fournir la réaction d'une surface à la sollicitation choisie. Nous obtenons donc la résultante à la surface de contact de l'insert avec le corps d'outil : 2450N.

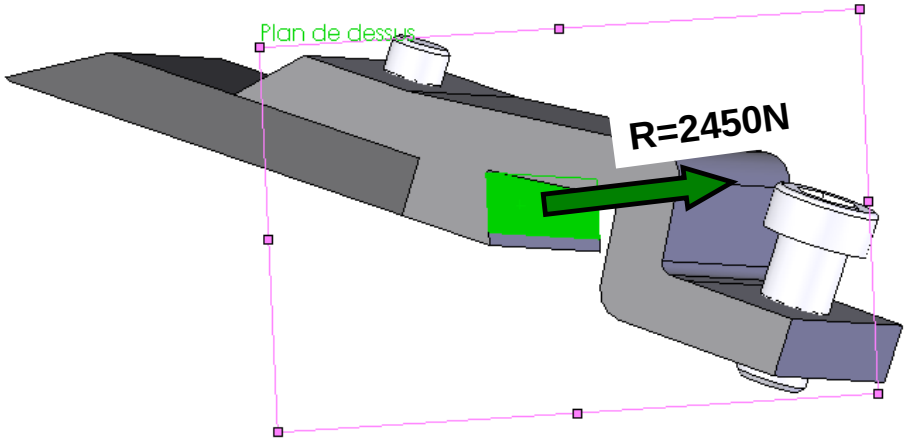


Figure 148 : Représentation de la force résultante à appliquer sur le corps d'outil

Pour le chargement du corps d'outil, nous nous plaçons dans le cas le plus défavorable : à savoir une branche de 15 cm de diamètre coupée à 1500 tr/min. Dans ce cas, la configuration de l'outil est telle que, à chaque instant, la branche n'est attaquée que par deux dents. Nous avons alors la réaction précédente appliquée sur les deux parois du corps d'outil (Figure 149).

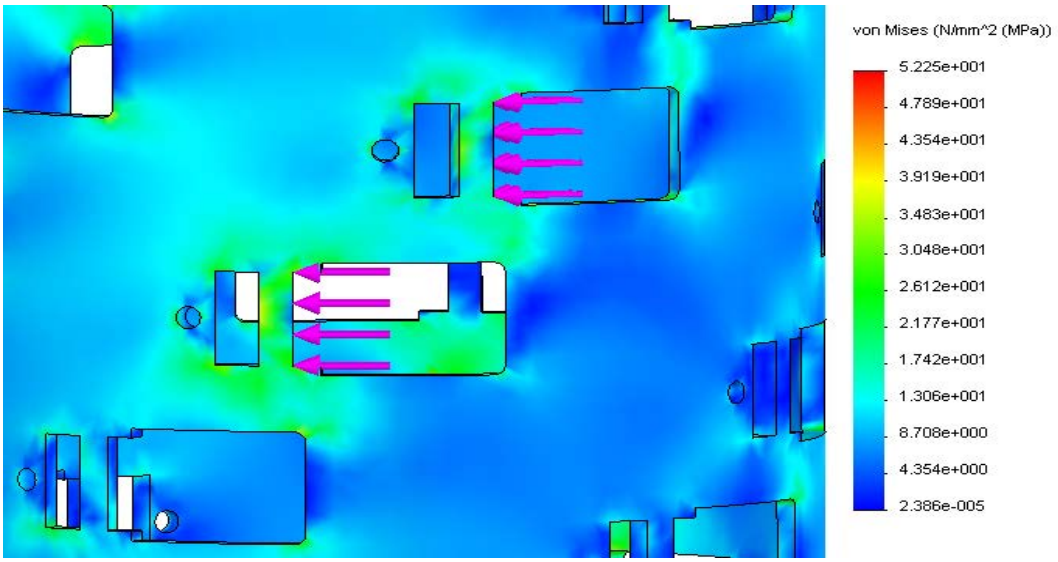


Figure 149 : Répartition des contraintes autour des ouvertures sur le corps d'outil

Ici encore, l'acier que nous allons utiliser possède une limite élastique située au dessus de la contrainte maximale du chargement : environ 200 MPa. De ce fait, nous sommes en mesure de dire que l'outil tel qu'il a été conçu autorise une vitesse de rotation de 1500 tr/min ainsi qu'une coupe de branche de 15 cm.

6.3 Essais de coupe

Il convient de préciser en ce début de paragraphe les conditions dans lesquelles ont été faits les essais sur chantier. Il faut tout d'abord savoir qu'il est plus difficile d'obtenir les conditions de coupe souhaitées en chantier qu'en laboratoire. Si nous reprenons chacun des paramètres utilisés, nous nous apercevons qu'ils sont souvent dépendants des contraintes de la réalité d'un chantier:

- Vitesse de rotation de l'outil : la vitesse de rotation de l'outil dépendant du débit d'huile hydraulique dans le moteur, lequel est dépendant de l'intégralité de la chaîne hydraulique : régime moteur du tracteur, prise de force, pompe hydraulique, longueur des flexibles… Cette vitesse est réglée par une manette des gaz dans la cabine du tracteur et est mesurée par un tachymètre à aiguille qui ne donne pas une mesure rigoureuse.
- Vitesse d'amenage de l'outil : celle-ci correspond à celle du tracteur. La vitesse d'un tracteur est, comme sur une voiture, fonction de la boite de vitesse de celui-ci. Le tracteur que nous possédions pour les essais ne pouvait pas aller en dessous de 1.5km/h (vitesse utilisée pour les essais). Cette vitesse a été mesurée en comptant les tours de roue et en chronométrant les trajets.
- Type de haie coupée : lors des essais, nous avons réussi à trouver quelques haies répondant à plusieurs conditions, la proximité, l'accord du propriétaire, la discrétion, la sécurité… Il va de soi que les haies trouvées ne correspondent pas tout à fait avec les premiers essais en laboratoire. Certaines haies étaient composées d'essences arbustives difficiles à couper (aubépine, rosiers, buis, noisetiers…)

Dans la mesure du possible, nous avons fait le maximum pour respecter les préconisations de coupe, mais certains paramètres étaient difficilement maîtrisables.

6.3.1 Montage et fonctionnement de l'outil

Les 54 inserts et les 54 couteaux ont été fixés mécaniquement par vis serrées à la clé à choc. Les deux flasques montées sur le coté ont pour but de fermer le corps d'outil et d'assurer le couplage sur la carcasse du coté de la transmission et du coté de la carcasse. Ces deux pièces sont constituées d'un disque sur lequel sont soudés des inserts filetés pour fermer le corps d'outil et d'un axe pour la fixation sur les roulements. Sur l'un des disques, des lumières ont été faites pour faciliter la récupération des copeaux. L'ensemble ainsi monté pèse 156kg, ce qui correspond au cahier des charges que l'on s'est fixé. La carcasse utilisée est une carcasse de FOREST BROYEUR prévu pour accueillir des rotors de 1.25m de long. L'avantage de cette carcasse est son ouverture importante sur la végétation. En raison du cercle de coupe important, il a fallu découper certaines parties de l'intérieur de la carcasse (trop volumineuses) et les remplacer par des fers plats soudés. La Figure 150 montre le résultat.

Figure 150 : Utilisation de la carcasse de FOREST BROYEUR et montage de l'ensemble 2

6.3.2 Essais et résultats

Cette campagne d'essais est une application des principes de coupes scientifiques obtenus en laboratoire. Nous partons d'un concept de coupe qu'il va falloir valider et améliorer. C'est une campagne d'essais plus lourde à mettre en place et plus coûteuse pour l'entreprise. Pour ces raisons, le prochain paragraphe traite davantage des améliorations technologiques de l'outil de façon chronologique que d'une campagne d'essais scientifiques systématiques.

6.3.2.1 Campagne d'essais n°1

La campagne d'essais n°1 a été réalisée sur une haie d'aubépine d'environ deux mètres de haut et à peu près autant de large. Elle est pourvue de feuilles et les diamètres de branche dépassent rarement les 3 cm. Les conditions de coupe sont les suivantes : angle de coupe de 55°, vitesse de rotation de 800 tr/min, 1.5 km/h. Nous essayons la coupe à l'horizontale et à la verticale, prise de passe : 60cm.

L'outil absorbe les 60cm de végétation sans difficultés au début mais finit par se bloquer à cause de branches emmêlées autour du rotor. Il y a un gros problème d'obstruction des branches sur la périphérie du rotor, ce qui provoque les blocages. Lors de conception de l'outil, un petit espace (5mm) avait été prévu de chaque coté des couteaux pour le passage des copeaux. Malheureusement, de nombreuses branches se coincent dans ces espaces et finissent par boucher les trous. A cela plusieurs conséquences :

- Les copeaux ne rentrent plus dans le corps d'outil
- Les branches qui dépassent cognent contre la carcasse
- Lorsque les branches deviennent trop nombreuses et que l'outil a une profondeur de passe trop importante, il y a risque de bourrage.
- Il y a une grande quantité de projections autour de la coupe, l'environnement du tracteur n'est pas sûr dans un rayon d'une vingtaine de mètres.

Figure 151 : Une partie de la haie une fois coupée par l'outil à 800 tr/min

L'état de surface de la haie n'est pas satisfaisant (Figure 151) pour plusieurs raisons : l'inclinaison des branches, l'essence arbustive fibreuse et sèche ainsi qu'une vitesse de rotation trop faible.

Figure 152 : Exemple de coinçage de branche entre le couteau et le corps d'outil et bourrage du rotor à cause de l'enroulement de branches pour 800tr/min

Nous avons donc modifié les paramètres de coupe afin d'améliorer l'état de surface des haies. Pendant cet essai, nous gardons toutes les conditions précédentes mais augmentons la vitesse de rotation à 1000 tr/min. A chaque fois, la mesure de la vitesse de rotation est effectuée par tachymètre sur l'axe de la poulie rotor. Le fait d'augmenter un peu la vitesse produit deux effets : une amélioration légère de l'état de surface obtenu sur les branches ainsi qu'une augmentation de l'inertie du rotor et donc diminution des risques de bourrages.

Figure 153 : Etat de surface obtenu avec une vitesse de rotation de 1000tr/min

Afin de vérifier la capacité de l'outil à fabriquer de bonnes plaquettes de chauffage, nous l'avons testé sur des arbres de hauts jets dans les mêmes conditions. Ces arbres (du châtaignier dans le cas présent) présentent l'avantage d'être nettement moins fibreux que les essences arbustives précédentes et donc de favoriser la formation des copeaux (Figure 154). Durant ces essais, il n'y a pas eu de bourrage et les copeaux formés sont, dans l'ensemble, de tailles plus acceptables.

Figure 154 : Type de haies coupées lors du deuxième essai

Nous avons comparé la granulométrie de ces deux essais : 1000 tr/min, 1.5km/h, 55° pour des essences arbustives et des arbres de hauts jets. La différence est considérable, la coupe d'essences arbustives produit une grosse proportion de grosses plaquettes ainsi qu'une allure granulométrique mauvaise. Les résultats avec le châtaignier sont bien meilleurs, une proportion de grosses particules plus faibles (moins de 5%) ainsi qu'une allure plus gaussienne de la courbe.

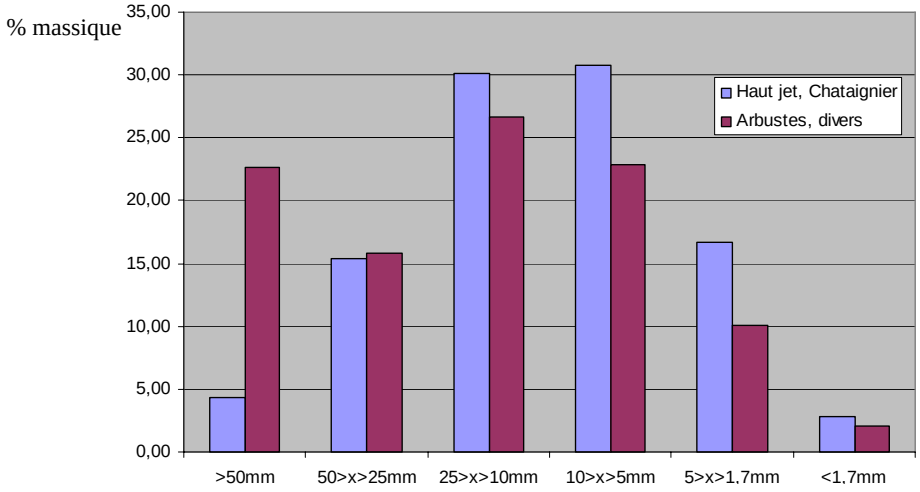


Figure 155 : Comparaison granulométrique entre de coupe d'arbres de haut jet et la coupe d'arbustes.

En conclusion de la campagne d'essais, nous pouvons dire que le concept de coupe de l'outil industriel est validé, il coupe les branches, broie celle-ci en plaquettes et les récupèrent dans le rotor. Il est clair que des problèmes subsistent comme le bourrage des branches et la récupération demande des améliorations. Ces problèmes viennent principalement du fait que les branches n'arrivent pas exactement perpendiculaires comme lors des essais de laboratoire, la nature est ainsi faite.

6.3.2.2 Campagne d'essais n°2 : modification des couteaux

Dans le but de réduire les phénomènes de bourrage de l'outil, nous avons mis au point deux nouvelles formes de couteaux. Ces deux formes de couteaux ont pour objectif de sectionner les branches qui viendraient se mettre entre le couteau et le corps d'outil (Figure 152). Le premier couteau appelé « couteau droit élargi » occupe l'espace des joues de l'ouverture dans le corps d'outil par une arête de coupe. Le second « couteau en U » possède également deux arêtes de coupe supplémentaires mais en refermant le couteau sur le corps d'outil (Figure 156). Il s'agit de ne pas uniquement couper sur un cylindre de coupe classique mais également de mettre en place des couteaux araseurs (existant sur des outils de toupillage par exemple). Cette façon de couper autorise une variation de l'inclinaison des branches.

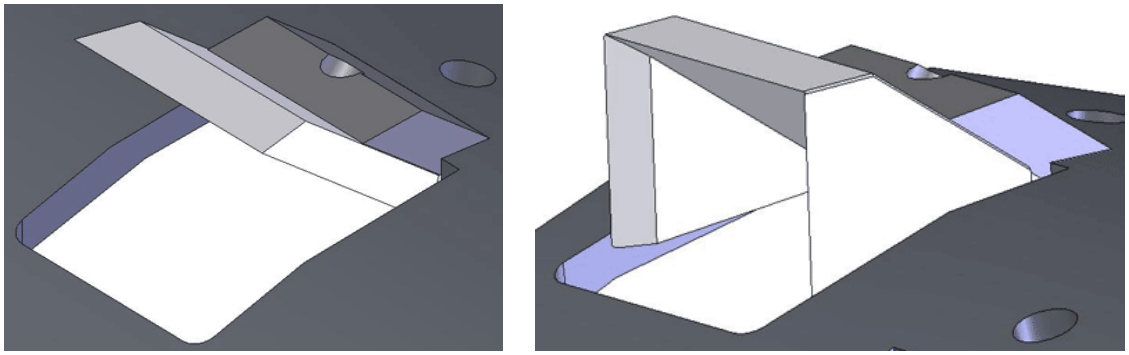


Figure 156 : à gauche, couteau droit élargi et à droite couteau en U à trois arêtes de coupe.

Pour des raisons de coûts, le rotor a été équipé sur sa moitié supérieure des couteaux en U et sur sa moitié inférieure des couteaux droits élargis. L'essai n°1 a été fait sur une haie d'aubépine d'environ deux mètres de haut et à peu près autant de large. Contrairement aux précédents essais, celle-ci présentait des branches de plus gros diamètres (jusqu'à 5 cm) et était dépourvue de feuilles. Les conditions de coupe sont les suivantes : angle de coupe de 55°, vitesse de rotation de 1350 tr/min, 1.5 km/h.

Le résultat est sans appel, les couteaux en U se comportent bien mieux que les couteaux droits élargis, les branches ne se coincent plus pour les couteaux en U et moins pour les couteaux élargis (Figure 157) et l'état de surface s'est nettement amélioré pour le couteau U (Figure 158). La vitesse de rotation élevée a permis d'obtenir un état de surface optimum sur la branche restante.

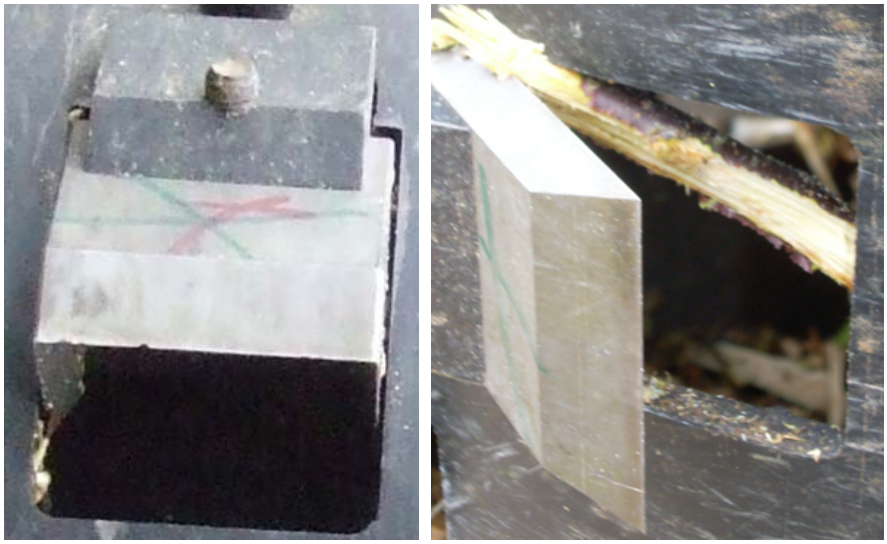


Figure 157 : à gauche couteau en U propre et à droite branche coincée dans un couteau droit

Figure 158 : à gauche coupe de branche avec les couteaux en U,
à droite exemple de mauvais état de surface obtenu avec les couteaux élargis.

Par la suite nous avons effectué un nouvel essai dans les mêmes conditions, sur la même haie mais avec une vitesse de rotation de 1700tr/min. Cette vitesse de coupe a été volontairement choisie très

haute pour voir son effet sur la granulométrie et l'état de surface de la haie (Figure 159). Nous avions déjà obtenu certains résultats lors des essais en laboratoire (paragraphe 5.3.2.1). Au niveau des plaquettes produites, les granulométries des deux essais possèdent la même allure. Il y a trop de grosses particules qui sont, la plupart du temps, rentrées dans le corps d'outil en étant pas suffisamment broyées. Elles sont généralement produites à chaque début de coupe des branches. La majorité (environ 50%) des plaquettes se situe entre 5 et 25 mm. La vitesse de rotation de 1700tr/min produit un meilleur état de surface certes, mais génèrent des plaquettes de tailles plus petites et la part de plaquettes de 5mm augmente de façon importante. La part de fines particules est également en hausse. Il s'agit donc de sur-qualité par rapport à 1350tr/min.

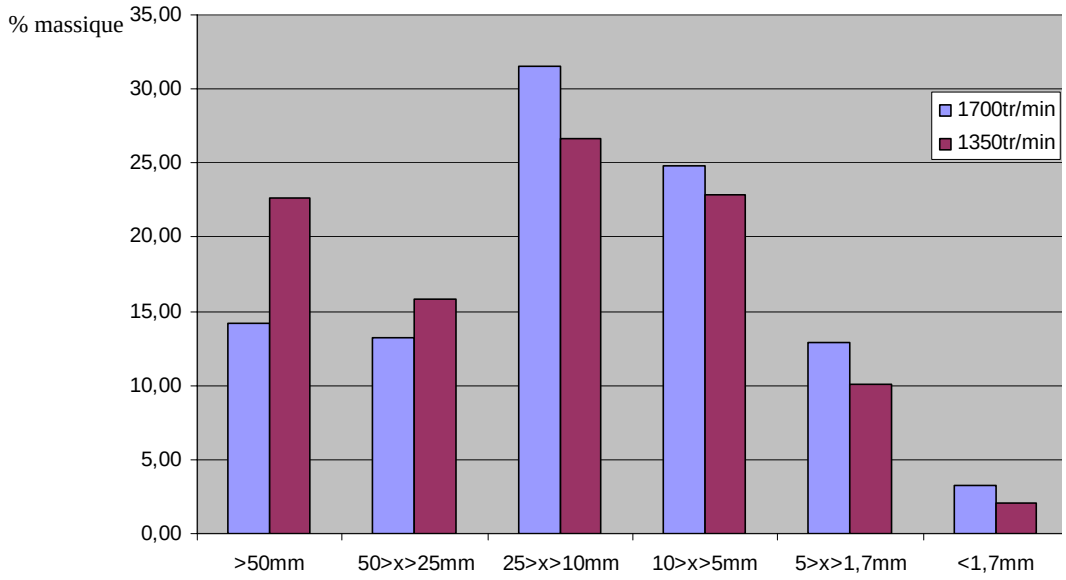


Figure 159 : Comparaison granulométrique entre deux vitesses de rotation de l'outil

Un dernier essai a été effectué sur des arbres de haut jet. Ces arbres présentent l'avantage d'être nettement moins fibreux et donc de favoriser la formation de copeaux davantage maîtrisée. Durant ces essais, deux arbres (un frêne et un acacia) ont été choisis pour être élagués, les copeaux ont été récupérés. Nous en avons mesuré la granulométrie et l'avons comparé à la précédente.

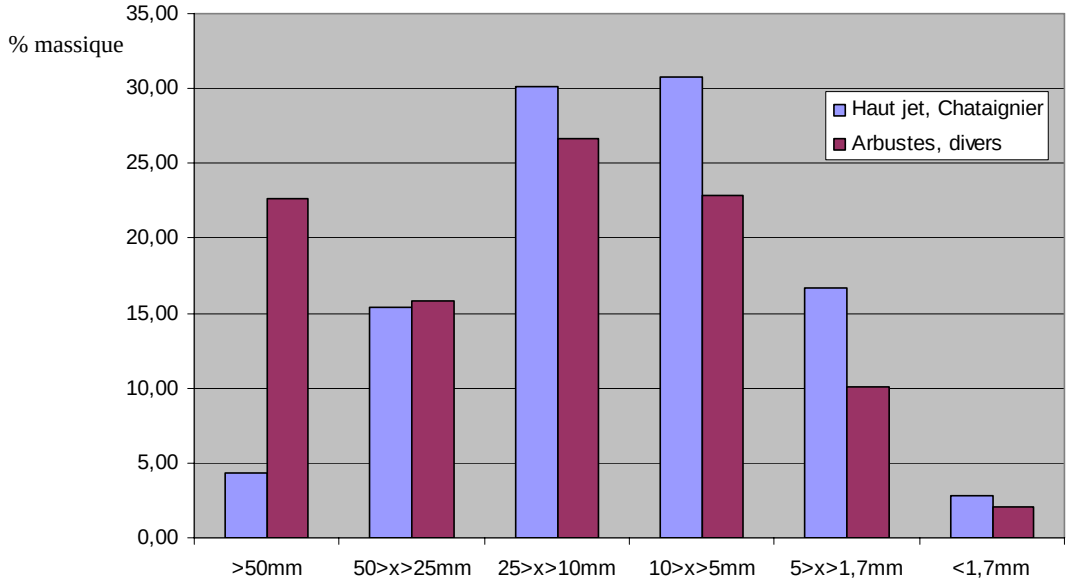


Figure 160 : Comparaison granulométrique entre de coupe d'arbres de haut jet et la coupe d'arbustes.

Les résultats des mesures granulométriques sont très différents suivant les essences, une haie d'arbustes filandreux formera des plaquettes de moins bonne qualité que celles d'un arbre de haut jet et ce pour les mêmes conditions de coupe. L'allure granulométrique est bien symétrique autour de la taille 5-25mm, il y a peu de fines et peu de grosses particules. Nous l'avons vu précédemment, la formation des plaquettes est régie par deux lois fondamentales : le tranchage puis le fendage. Dans le cas des essences arbustives présentes dans les haies des essais, l'étape de tranchage ne se fait pas toujours convenablement, c'est pourquoi les plaquettes ne sont pas correctement formées et la granulométrie n'est pas convenable. Dans les essences de haut jet, l'arête de coupe pénètre convenablement dans la matière par tranchage et le processus de fendage par cisaillement des fibres peut s'effectuer. Quelle que soit la qualité de l'usinage et donc des plaquettes obtenues, la récupération de celles-ci reste toujours un problème, la prochaine campagne d'essais a tenté de résoudre ce point.

6.3.2.3 Campagne d'essais n°3 : Modification de l'aspiration

Les essais précédents ont permis de valider l'efficacité du couteau en U, c'est pourquoi un jeu complet de couteaux a été fabriqué afin d'en équiper l'intégralité du rotor. De nombreux changements ont été opérés sur la carcasse :

- Le moteur hydraulique a été déplacé sur la partie supérieure de la carcasse afin de libérer la partie basse.
- Un nouveau palier a été monté permettant, en plus de la rotation du rotor, le passage des copeaux en vue de leur récupération. Un tubage en coude a également été monté (Figure 161).
- Le fond de la carcasse a été modifié pour favoriser le passage des branches (Figure 161).

- Aspiration : pour les essais, une remorque aspiratrice a été couplée à l'outil grâce à un tuyau souple afin de récupérer les copeaux. Cette remorque est alimentée en puissance par un autre tracteur et les deux porteurs avancent à vitesse constante et identique pendant les essais.

Grâce à ces changements, l'action de la vitesse de rotation de l'outil combinée à l'aspiration de la turbine crée une dépression d'air au niveau de la fenêtre de passage du copeau. Ainsi chaque copeau formé sera aspirée et évacué vers la remorque de stockage.

Figure 161 : A gauche, évacuation des copeaux par la partie basse, palier creux et tubage en coude et à droite, aménagement du fond de la carcasse

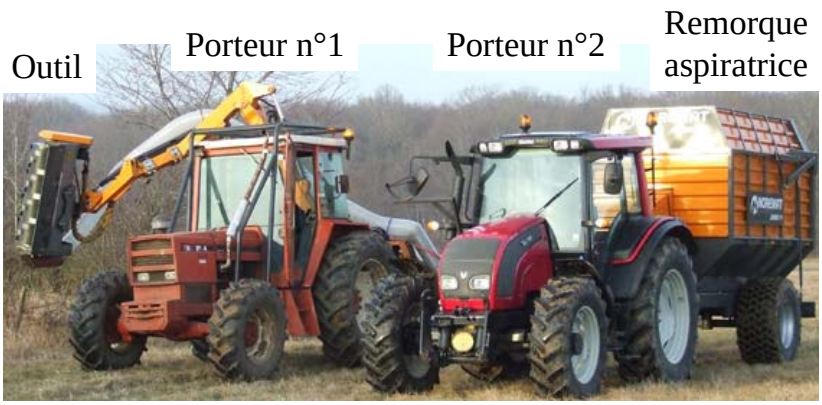


Figure 162 : Mise en place des deux porteurs, de l'outil et du système d'aspiration

Les conditions de coupe pour ces essais sont les suivantes : angle de coupe de 55°, vitesse de rotation de 1350 tr/min, 1.5 km/h. La haie est une haie de champ composée d'essences arbustives d'environ 3.5m de haut, 2m de large et 300m de long. La prise de passe variable est comprise entre 40cm et 1m.

Figure 163 : Allure générale de la haie pour ces essais

Lors de ces essais, l'outil a joué son rôle de coupe et broyage de la haie. A une vitesse de 1.5km/h, il est capable de réduire le volume d'une passe de 1.250m de hauteur par environ 1m de profondeur. Par contre, l'état des haies n'est pas encore satisfaisant, certaines branches sont éclatées (Figure 164). L'aspiration présente également quelques défauts, de longues tiges se forment lors de la coupe et viennent se coincer au niveau du palier creux et du coude, réduisant fortement l'aspiration (Figure 165). De ce fait, les copeaux ne sont pas aspirés en temps réel, s'accumulent dans le rotor, celui-ci vibre et les projections augmentent. Les projections renvoient les copeaux dans la haie et le taux de récupération est faible (Figure 166).

Figure 164 : Photo d'une partie de la haie particulièrement mal coupée

Figure 165 : Ouverture du coude d'évacuation après coupe et démontage, grande tige qui bloquent tout

Figure 166 : Plaquettes tombées au pied de la haie pendant la coupe et quantité de plaquettes obtenue dans la benne après environ un kilomètre d'entretien

Pour conclure sur ces essais, l'outil remplit les trois fonctions principales de la façon suivante :

- Fonction COUPER : toutes les branches sont coupées mêmes avec une prise de passe dépassant un mètre. Pour les essences arbustives, l'état de surface des branches n'est encore pas satisfaisant.
- Fonction BROYER : Les branches sont effectivement réduites en volume par broyage, mais la qualité des plaquettes obtenues est encore fortement dépendante de l'essence coupée. Pour les essences arbustives, la proportion de grandes tiges et donc de bourrage dans l'outil reste trop importante.
- Fonction RECUPERER : 30% correspond à peu près au pourcentage de biomasse récupéré par le système. Ce chiffre parait faible mais peut être rapidement amélioré. Dans tout les cas, le principe innovant de récupération des copeaux produits par l'intérieur du corps de l'outil fonctionne et reste prometteur. Ces pertes sont encore importantes car de trop grosses tiges sont produites qui bouchent l'évacuation en coude.

Chapitre 7. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce chapitre résume les thèmes abordés durant ce partenariat de recherche. Plusieurs travaux ont été menés simultanément et ainsi plusieurs retombés pour le laboratoire et pour l'entreprise ont pu être dégagées.

7.1 Bilan pour l'entreprise

Le cadre de la thèse CIFRE est tout d'abord, pour l'entreprise, une nouvelle méthode de recherche et de développement par rapport aux habitudes. Le résultat est prometteur : un nouveau concept de coupe a été découvert, répondant en grande partie au cahier des charges contraignant. Ce concept de coupe effectue trois fonctions principales (couper, broyer et récupérer) alors que les outils traditionnels n'en effectuaient qu'une. Les problèmes de productivité et de sécurité existants sur les anciens modèles sont fortement réduits. Cette démarche de développement et son résultat qu'est le nouvel outil s'inscrivent parfaitement dans la démarche actuelle de l'entreprise : mieux couper les produits d'accotements routiers. Grâce au nouveau concept de coupe, nous respectons les contraintes de masses et d'encombrements habituels de ces outils tout en divisant par deux la vitesse de rotation. La coupe d'une branche de 5cm de diamètre et sa réduction en plaquettes calibrées pour le chauffage (25*10*5mm) ne consomment pas plus de puissance qu'un aspirateur domestique (1200W).

La mise au point de ce nouvel outil de coupe a permis d'approcher la coupe des branches de façon plus scientifique, de conserver le projet en toute discrétion et ainsi de pouvoir le protéger. Ainsi ce concept de coupe, la forme des couteaux, le système d'aspiration des copeaux par l'intérieur sont autant de systèmes brevetable par l'entreprise et donc autant de dépôts pour l'inventeur, garantissant une certaine avance pour NOREMAT par rapport à ses concurrents.

En dehors de l'aspect purement usinage, d'autres études ont permis à l'entreprise d'asseoir ses compétences dans le domaine des énergies renouvelables et du marché de l'entretien routier. Chronologiquement, mes études ont permis la mise à jour des bases de données de l'entreprise sur le marché de l'entretien des accotements routiers (1800000km en France), sur la diversité des haies françaises et sur les méthodes pour les caractériser (méthodes d'inventaires, moyens informatiques…). Ainsi il est désormais possible, avec l'utilisation d'une méthode à la fois simple, moderne et rapide, d'effectuer un travail statistique sur les caractéristiques d'une haie en France. Grâce à cette base de données, l'entreprise sera capable de répertorier les zones bocagères nécessitant le plus de travail (Figure 25 : Carte représentant le pourcentage de surface bocagère par rapport à la surface agricole utile.) et ainsi effectuer une démarche commerciale et informative auprès de clients ciblés. L'autre extrémité de la filière a été explorée, à savoir les possibilités de valorisation des déchets ligneux issus de l'entretien des haies (compostage, paillage, traitements thermiques…). Cette étude a participé au développement de la filière bois énergie au sein de l'entreprise ainsi qu'à la mise en place d'une veille technologique.

7.2 Bilan scientifique

Le bilan scientifique est présent également : ce travail de recherche a mis en évidence certaines particularités de la coupe d'éléments flexibles ligneux, domaine peu abordé jusqu'à présent.

La première des étapes a été de trouver une voie de valorisation efficace des produits ligneux d'élagage de haies de bords de route : le bois énergie nous est apparu comme la voie la plus rentable pour ces déchets. Le cahier des charges de ce type de combustible est assez contraignant mais a permis d'orienter la conception de l'outil de coupe autour de deux points : le plus important est la granulométrie des plaquettes et l'autre, plus secondaire, est le taux de cendre. La granulométrie est le paramètre le plus important à prendre en compte pour l'analyse des conditions de coupe du futur outil, c'est elle qui va déterminer les conditions d'utilisations idéales de l'outil. Une étude bibliographique de la formation des copeaux et des plaquettes en usinage a mis en évidence deux phénomènes de formation des plaquettes : le tranchage et le fendage. Ces deux phénomènes, une fois maîtrisés permettent la correcte formation des plaquettes. Le fait que l'élément à couper soit flexible est également un élément important à prendre en compte, il est inutile de prévoir les bons paramètres de coupe si le matériau à couper n'est pas synchronisé à l'outil. Pour que tout cela fonctionne correctement, il faut mettre la branche en traction lors de la coupe et favoriser la formation de copeaux de type I. Nous arrivons à ce résultat en utilisant un angle de coupe important (55° pour nos essais). L'adéquation entre la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avance des branches a également un rôle prépondérant : l'outil de laboratoire possédant une capacité de coupe donnée, il ne faut pas descendre en dessous de 800tr/min et éviter de faire avancer la branche à plus de 1.5km/h (25m/min). Avec ces conditions mises en place, l'outil est capable de couper de façon nette et de transformer en plaquettes calibrées les branches jusqu'à un diamètre de 5cm. Pour la récupération des plaquettes produites, la tâche est plus délicate : il n'est pas possible de concevoir un carter de récupération englobant l'angle de projection des plaquettes (120°). La solution qui a été trouvée est de capter le copeau dès sa formation à l'intérieur du corps d'outil : cette méthode, en cours d'amélioration, est déjà plus efficace qu'un carter d'aspiration standard. En ce qui concerne la consommation de puissance, le choix d'un angle de coupe important réduit de façon significative la consommation d'énergie de l'outil lors de la coupe pour attendre environ 1000W pour 18cm de hauteur de coupe et pour une branche de 4cm de diamètre.

En ce qui concerne l'analyse de la coupe, les copeaux obtenus, de taille importante, ont pu être analysés. Nous avons pu voir les copeaux formés, l'évolution des modes de coupe ainsi que la répartition des efforts de coupe lors des différentes étapes d'usinage. La compréhension de l'interaction entre tous ces facteurs a été la clé de la réussite de la conception de l'outil de coupe.

7.3 Perspectives de travaux

J'ai volontairement réuni en un seul paragraphe les perspectives scientifiques et industrielles car le début de ce projet a commencé par une thèse CIFRE et doit se poursuivre avec le même type de partenariat. Les perspectives peuvent être envisagées sur deux fronts principaux : un travail sur l'outil et un travail sur les haies. Ces deux travaux doivent être menés simultanément, tout comme cette étude, sous la forme d'un couple : le Couple Outil-Matière (COM) [NORME E66-520-1 ; 6] (paragraphe 1.2.1). Cette méthodologie lié à la coupe permet de mettre en relation les caractéristiques d'un matériau à couper et d'un outil pour définir un domaine d'utilisation convenable.

Un travail sur l'outil pourra apporter des réponses aux questions de qualité d'état de surfaces des haies, sur la qualité des plaquettes produites et sur la récupération. Pour l'instant, l'outil, même s'il répond au cahier des charges, peut être amélioré sur ces trois points. La qualité de l'état de surface va dépendre en partie des essences de bois en présence : pour une haie d'essence arbustive, le résultat n'est encore pas satisfaisant. Cela vient, en parti, du fait que ces essences produisent des fibres difficiles à sectionner et la solution pourrait être de les couper par cisaillement (ciseaux, contre couteaux, recoupe par un nouvel outil…) plutôt que par tranchage. A cause de ces fibres, la qualité des plaquettes produites s'en trouve également modifiée. Plusieurs solutions existent et sont à expérimenter : recoupe à l'intérieur du rotor, système de calibrage par grille…La récupération est également une source de développement de l'outil, le rendement est encore trop faible. Ici aussi, de nombreuses solutions existent : travail sur les flux d'air dans le rotor, repérage des zones de bourrage, élimination de ces dernières…

Le travail sur les haies, au travers de la constitution d'une base de données statistiques, permettra de cibler les besoins des clients pour un entretien de haie particulier. Grâce à ce ciblage, il sera possible de proposer un réglage de l'outil adéquat aux caractéristiques du travail à effectuer. Prenons un exemple : un client vient de décrocher un contrat d'entretien des haies pour une région. Il s'adresse à la société NOREMAT, qui consulte sa base de données, examine les caractéristiques des haies présentes dans cette région et propose aux clients un réglage de l'outil particulier, une optimisation des conditions de coupe ou une valorisation particulière des produits. L'idée étant toujours de proposer aux clients de l'entreprise NOREMAT une NOuvelle REntabilité du MAtériel via l'utilisation d'un outil scientifique qu'est le COM.

Chapitre 8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Charte de l'environnement, site du gouvernement français, LEGIFRANCE, http://www.legifrance.gouv.fr/html/constitution/const03.htm, 2004

2 T.TUOT, Le grenelle de l'environnement : rapport du rapporteur général, 2007, 39p.

3 Base de données du gouvernement français PEGASE, http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/dep2000.pdf, août 2008

4 Direction générale de l'énergie et des matières premières ; « Les énergies renouvelables en France de 1970 à 2003 ; DGEMP ; Mars 2005 ; 50p.

5 Inventaire Forestier National ; « Bois Energie : Les forêts ont de la ressource » ; Lettre de l'IFN n°9 ; Septembre 2005 ; 8p.

6 Norme NF E66-520-1, Domaine de fonctionnement des outils coupants - Couple outil-matière - Partie 1 : présentation générale, sept 1997

7 Entreprise NOREMAT ; « L'essentiel NOREMAT » ; document interne ; Février 2006

8 SNACC ; Site Internet du Syndicat National des ACCoroutistes, http://www.snacc.fr/profession/

9 GAUTIER A., Les chiffres clés de la forêt privée, Forêt privée française, 2008, 24p, http://ddata.over-blog.com/xxxyyy/1/18/16/47/foret-chiffres-cles-2008-copie-1.pdf

10 BOUILLIE J., Le bilan patrimonial des forêts domaniales, Office National des Forêts, mai 2006

11 SESSI, Le bois en chiffre édition 2008, Ministère de l'économie de l'industrie et de l'emploi, 2008, 16p.

12 P.MARTIN, Bois et productique, cépaduès-éditions, p.34-48

13 BONNET J.L., Guide de gestion des déchets de bois, CTBA, p.37, 2005

14 CHANRION P., La valorisation des produits connexes du bois, CTBA, 1992, 101p.

15 BIOMASSE NORMANDIE, Le bois énergie, une composante essentielle de la filière forêt-bois, juin 2003, 20p.

16 ALKAEST Conseil et CVS Consultant, Le marché français des appareils domestiques au bois, ADEME, 2000

17 CHEVROU R., 1988. Inventaire Forestier National, méthodes et procédures. MAP, Paris.

18 J.P. HOUSSEL, Aménagement officiel et devenir du milieu rural en France, 5e colloque franco-polonais sur l'aménagement rural, 1980

19 J.BAUDRY, A.JOUIN, De la haie aux bocages : Organisation, dynamique et gestion, INRA éditions, 430p, 2003

20 A. MEYNIER, Les paysages agraires. Armand Colin, Paris, 192p.

21 CAIX C., 1994, Pas de foyers sans feu, Cahiers AGRESTE, 20, P. 41-47

22 Site Internet de l'Inventaire Forestier National : www.ifn.fr/presentation

23 Site Internet du Ministère de l'équipement, des transports, de l'aménagement, du territoire, du tourisme, de la mer : http://www.route.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=35

24 AGRESTE la statistique agricole, site Internet : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/

25 POINTEREAU P., 2002. Les haies, évolution du linéaire en France depuis 40 ans. SOLAGRO, Toulouse, 9p.

26 CINOTTI B., Production et récolte de bois en France: proposition de balance internationale de la ressource forestière, Rev for fr., 6, 675-688, 1995.

27 S.A. CHANNIWALA, P.P. PARIKH, A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels, August 2001, 13p.

28 Direction générale de l'énergie et des matières premières, Les énergies renouvelables en France de 1970 à 2005, juin 2006, http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/historique-enr02.pdf

29 BUREL F., BAUDRY J., Production en biomasse des cépées du bocage. Marchésieux (Manche). Rennes, Centre régional d'études biologiques et sociales, 78p.

30 Inventaire Forestier National d'Isère (38) : http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IFN_38_3_ISERE.pdf

31 Inventaire Forestier National du Haut-Rhin (68) : http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IFN_68_3_HAUT_RHIN-2.pdf

32 A.CABANETTES, L.PAGES, Effets des techniques de coupe sur la croissance et le nombre des rejets dans un taillis de châtaignier (*Castanea sativa Mill.*), ELSEVIER, Février 1989, p.75-85

33 Site Internet du gouvernement français sur la diffusion du droit: http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000006834444&dateTexte=20081208

34 Site Internet du gouvernement français sur la diffusion du droit :

http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000006834445&dateTexte=20081208

35 J.DOYEN, C.SEIFFERT, Mesures d'efforts et de puissances de coupe d'éléments flexibles, Projet ingénieur 3A, ENSTIB, 2008

36 ÖNORM M 7133 : 1998 02 01 Holzhackgut für energetische Zwecke - Anforderungen und Prüfbestimmungen

37 Cahier des charges pour les plaquettes de chauffage sur chaufferie HARGASSNER

38 MARTIN P., Processus de coupe et scie à ruban, Le bois matériau d'ingénierie, A.R.BO.LOR, p.302, 1994.

39 KELLER R., Le bois matériaux d'ingénierie : La constitution du bois, A.R.BO.LOR., p.17, 1994

40 E. KIVIMAA, 1950, Cutting forces in wood working, Jukaisu publication, Helsinki, 1950

41 McKENZIE W.M., 1960, Fundamental analysis of the wood cutting process, thesis of the department of wood technology, University of Michigan, Ann Arbor.

42 NORME AFNOR, Grandeur de base pour la coupe et la rectification, Association Française de Normalisation, décembre 1993.

43 NORME AFNOR, Angles des outils coupants: formules de conversion liant les angles de l'outil et les angles de travail, Association Française de Normalisation, juin 1985

44 NORME AFNOR, Grandeur de base pour la coupe et la rectification- Forces, énergie et puissance, Association Française de Normalisation, juin 1985.

45 KOCH P., Wood machining process, Ronald press, Cambridge, 1964

46 FRANZ, N.C., 1958, An Analysis of wood-cutting process. Ph.D. thesis, University of Michigan, Ann Arbor, University of Michigan, 152 pp.

47 McKENZIE, W.M., The basic wood cutting process, Chip formation in planning and veneer, Wood Machining Seminar, October 10-11 1967.

48 JUAN J., Comment bien usiner le bois, CTBA, Paris, 1992

49 BOUCHER J., Caractérisation de la coupe rotative du bois, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1, Epinal, 2007

50 FISCHER R., Wood cutting simulation-A program to experiment without machine, IWMS 14, ENSTIB, 12-19 September 1999, 553-562p.

51 McKENZIE W., Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards, J.Wood Sci. technol., 35(6), 2001, 563-569

52 EYMA F., Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l'aide de leurs paramètres mécaniques, thèse de doctorat en sciences du bois, UHP Nancy 1, Epinal, 2002

53 BOUCHER J. MEAUSOONE PJ., MARTIN P., Influence of the moisture content on chips formation in wood milling process (90-0), Proceedings of the 16th international wood machining seminar (IWMS 16-2003), Faculty of Sciences and Engineering, Shimane University, Matsue, Japan, 14-30 august, 2003, 430-438.

54 DUONG L., SAINON R., Travail mécanique du bois, Techniques de l'ingénieur

55 STEWART H.A., LEHMANN W.F., Cross-grain cutting with segmented helical cutters produces good surfaces and flakes, Forest Products Journal, 24(9):104-106, 1974.

56 JONES C.W., Cutterheads and knives for machining wood, Seattle, WA, 138 p., 1994

57 LAURIER.J.P, Comment déchiqueter des petits bois pour l'énergie, AFOCEL, Fichier N°544, 1997, 6 p.

58 ABDALLAH R., AUCHET S., Détermination des paramètres de coupe influents sur la qualité des plaquettes forestières, Séminaire RP2E, Janvier 2009

59 BUCHANAN J. G., DUCHNICKI T. S., Some experiments in Low-Speed Chipping, Pulp and paper, Canada, 65(5): T-235, 1963.

60 UHMEIER A., Experimentell och numerisk analyse av flisninf smat trychkimpregnering av ved, PhD. thesis, institutionen för pappersteknik, Stockholm, Sweden, 1993.

61 GOLLI G., FIORAVANTI M., SODINI N., UZIELLI L., Wood processing : a contribute to the interpretation of surface origin according to grain orientation, proceeding of the 17th international wood machining seminar (IWMS 17-2005), University of Applied Sciences, Fachlochschule, Rosenheim, Germany, 26-28 September 2005, 377-382.

62 TWADDLE, A., The influence of species, chip length, and ring orientation on chip thickness, Tappi Journal, Vol.80, No.6. (1997)

63 HOUZIAUX G., COLLET R., HERNANDEZ R., Analyse de la fragmentation des plaquettes par slabber, ENSAM CLUNY, 56 p., 2008.

64 HERNANDEZ R., BOULANGER J., Effect of rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter, Forest Product Journal, vol.47, No.4. (1997)

65 UHMEIER A., Some fundamental aspects of wood chipping, Tappi Journal, Vol.78, No.10, 1995.

66 NORME IEEE 1220, Standard for application and Management of the Systems Engineering Process, janvier 1999

67 NORME EIA 632, Processes for engineering a system, Avril 1998

68 NORME ISO 15288, Systems Engineering – System Life-Cycle Processes, Novembre 2003 ou AFNOR Z 67-288 (Ingénierie systèmes – Processus de cycle de vie des systèmes)

69 NADEAU J.P., PAILHES J., SCARAVETTI D., Des outils de l'analyse fonctionnelle vers la créativité technique, International Journal Of Design and Innovation Research, Vol 3, N°3/4, pp87-106, Paris.

70 JAOUI H., La créativité, mode d'emploi, Editions ESF, 1996.

71 E.NEAU, M. VIELLART, Le diagnostic d'un projet d'innovation, Novembre 2003, http://erwan.neau.free.fr/Toolbox/Diagnostic_projet_innovation.htm

72 E.NEAU, M. VIELLART, Le risque innovation (technologie, marché, produit), Novembre 2003, http://erwan.neau.free.fr/Toolbox/Risque_innovation.htm

73 DE LA BRETESCHE B., La méthode APTE d'analyse de la valeur et d'analyse fonctionnelle, Editions PETRELLE, 2000.

74 TASSINARI R., Pratique de l'analyse fonctionnelle, DUNOD, Paris, 2003.

75 C. DE BAILLENCOURT et al., Conception des dispositifs de captage sur machines à bois, INRS, Paris, 2002, 72p.

Annexe 1. LA VALORISATION DES DECHETS D'ELAGAGE

L'étude de la valorisation des déchets d'élagage de haie a été un travail préliminaire au projet proprement dit afin de permettre à l'entreprise de faire des choix de directions de recherches. Cet annexe décrit quelques-unes des étapes qui ont permis d'aboutir au choix du bois énergie comme voie de valorisation et par suite l'adaptation de l'outil pour cette voie. Il s'agit d'un rapport remis à l'entreprise NOREMAT, dans ce but.

1.1 Caractérisation : qu'est-ce qu'un déchet d'élagage de bord de route ?

1.1.1 Généralités

Dans un premier temps, la loi du 15 juillet 1975 (Art. L.541-1 du code de l'environnement), nous indique « qu'est déchet, au sens de la loi, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

Dans le cas de l'élagage de bord de route, nous sommes en présence de deux types de déchets : les déchets bois (élagages et coupes de matières ligneuses) et les déchets verts (tontes et tailles de feuillages). Les textes classent le déchet bois issus de l'élagage comme « déchets de bois non adjuvantés » (code déchet : 02 01 05) et le déchet vert comme « déchets verts encombrants » (code déchet : 19-12-07). Ils sont tous les deux de la classe des DIB : Déchets Industriels Banals.

Figure 1 : Déchets ligneux code : 02-01-05

Figure 2 : Déchets verts code : 19-12-07

Toujours selon le code de l'environnement (art. L. 541-2), « Toute personne qui produit ou détient des déchets,…, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination… ». En d'autres termes, les collectivités locales assurant l'entretien des accotements routiers, sont obligées d'éliminer, d'une manière ou d'une autre les déchets issus de cet entretien.

L'utilisation du bois comme source d'énergie rentre dans le cycle naturel du carbone comme le montre le schéma suivant :

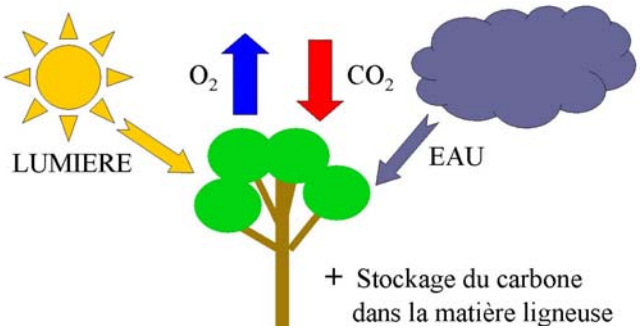


Figure 3 : Le cycle du carbone et le bois-énergie(source : ITEBE)

Il y a encore une trentaine d'années, les produits issus du débit du matériau bois étaient considérés comme des déchets inutilisables, sales et encombrants. Les nouvelles valorisations possibles font que ces « déchets » sont désormais appelés « *sous produits* » ou « *produits connexes* ».

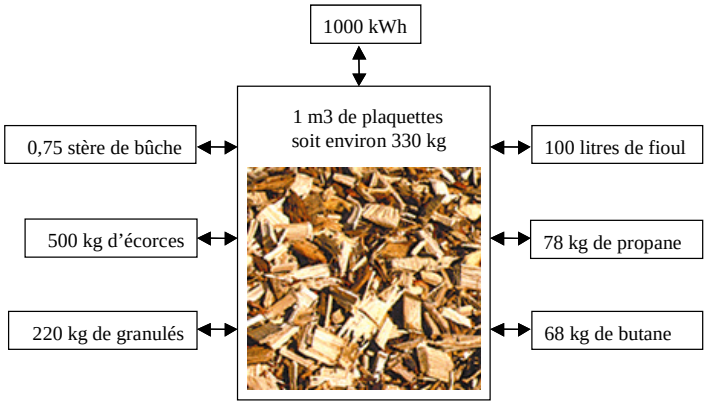


Figure 4 : Equivalences énergétiques de différents combustibles (source : CTBA)

1.1.2 Cas des déchets de bords de route

Lors de la coupe d'un élément ligneux, on estime à environ 60% de son volume total, la part de produits connexes : cela comprend 30% en houppiers et branchages et le reste étant composé des chutes, des sciures et autres copeaux issus de la filière bois.

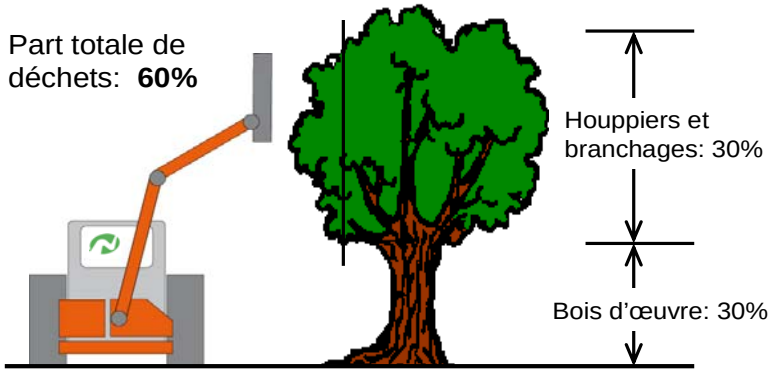


Figure 5 : Part des déchets dans l'exploitation d'un arbre (CTBA)

En général, les volumes des branchages sont valorisés pour les arbres de forêt, mais pas pour ceux de bords de route. Cela est dû aux types de produits, qui sont généralement de faibles diamètres, de

mauvaises rectitudes et très ramifiés, dont la valeur marchande est faible. Si l'on devait résumer la caractérisation les déchets que l'on obtient à la suite d'un entretien des haies fait par les machines NOREMAT :

- Se sont des branches de matière ligneuse, ramifiées pouvant contenir encore du feuillage,
- Les sections et les longueurs sont faibles et variables (allant de 0.5cm à 5cm pour le diamètre).
- Une fois coupé, le bois est encore vert et possède une masse volumique apparente faible.
- Malgré tout, cela reste de la biomasse, en grande quantité et gratuite, elle doit être revalorisée comme telle.

Le recensement du linéaire de haies en France n'est pas chose aisée, et seul l'Inventaire Forestier National s'est réellement penché sur le sujet : l'IFN définit une haie comme:« Un élément boisé, linéaire, irrégulier, de longueur minimale de 25m et de largeur maximum de 10m, contenant au moins 3 arbres recensables et en moyenne 1 arbre recensable tous les 10m ».

Voici donc d'où peut provenir les déchets que l'on souhaite valoriser :

Types de voies		Linéaires	Sources
Autoroutes	concédées non concédées	7 840 km 2 543 km	Ministère du transport et de
Routes	nationales départementales communales	27 893 km 362 033 km 609 635 km	Ministère du transport et de l'équipement
Voies	ferrées	32 888 km	Réseau Ferré Français, SNCF
	fluviales	8 500 km	Voies navigables de France, Ministère du transport
Chemins	forestiers	100 000 km	Inventaire Forestier National
Pistes	cyclables	8 000 km	Ministère du transport et de l'équipement [GOV 05/ix]
	cavalières de randonnées	9 000 km 11 000 km	
		1179332 km	

Figure 6 : Tableau récapitulatif des linéaires de haies disponibles en fonction des types de route

Les autoroutes concédées sont celles qui sont désormais entretenues par des sociétés d'autoroutes à titre privé alors que celle non concédées appartiennent et sont gérées par l'Etat Français.

Toujours selon SOLAGRO, en moyenne, une haie française bien entretenue aurait un accroissement de 4 m^3/km/an de matière ligneuse broyée. De plus, un vieillissement des haies tendrait à augmenter le volume de bois sur pied par km: passant de 78 m^3/km à 93 m^3/km. Ce n'est qu'une moyenne, car les haies françaises ont la particularité d'être très diversifiées. Si l'on effectue un rapide calcul : 500 000 km de routes contenant des haies, chacun possédant deux haies par km qui produisent 4m^3 par an; le volume maximum disponible en brut par an s'élèverait à 4 millions de m^3. La valeur est estimée mais, si elle s'avère réalisable, nous disposerons d'un volume broyé de biomasse de 4 millions de m^3 par an qui pourront se rajouter à ce que consomment les français à l'heure actuelle. De surcroît, cette diversité des haies françaises ne permet pas de déterminer avec certitude les essences qui la composent. Nous savons seulement qu'il s'agit, dans la majorité des cas de feuillus (80% environ).

1.2 Revalorisation : quoi en faire ?

Il existe de multiples possibilités de revalorisation des déchets bois, la liste suivante n'est étant qu'une partie non exhaustive. Il s'agit, à plus long terme de proposer à nos clients des machines capables de « traiter » des déchets d'élagage de bord de route afin que l'utilisateur puisse revaloriser ces produits connexes.

1.3 Le compostage

Le compostage est un processus aérobie qui facilite et accélère la transformation des matières organiques fermentescibles par de nombreux micro-organismes et qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur important. Il aboutit, s'il est bien mené à la formation d'un résidu déshydraté, désodorisé, hygiénisé, stabilisé appelé compost. Les déchets fermentescibles sont ceux qui peuvent faire l'objet d'une fermentation: transformation de certaines substances organiques sous l'action d'enzymes sécrétées par des micro-organismes. Les déchets organiques fermentescibles contiennent en proportions très variables et sous des formes plus ou moins accessibles aux microorganismes aussi bien des produits simples et facilement fermentescibles tels que les sucres, l'amidon, les graisses, les protéines, etc., et d'autres dont la décomposition biologique est beaucoup plus lente (hémicellulose, cellulose, lignine, etc.).

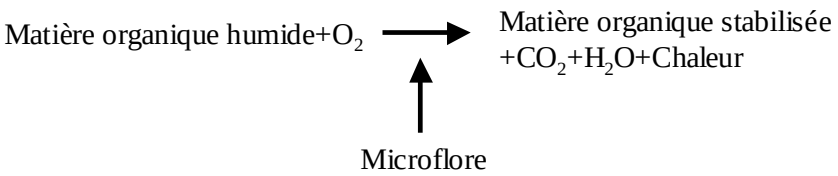


Figure 7 : Processus d'oxydation de la matière organique

La qualité du processus de compostage est fonction de 3 paramètres ou conditions environnementales qui sont nécessaires pour une bonne activité biologique :

- L'humidité; pour le compost de déchets verts l'humidité optimum est de 60%,

- L’aération pour faire face aux besoins en oxygène de la microflore,
- Le rapport carbone/azote (C/N) qui tend à diminuer au cours du processus de compostage.

Les déchets fermentescibles entrant dans le processus de compostage sont :

- Les papiers et cartons,
- Les déchets de cuisine,
- Les déchets de jardin, appelés aussi « déchets verts »
- Les boues de station d’épuration
- Les déjections issues des élevages d’animaux
- Les graisses et sous-produits de l’industrie agroalimentaire.

Par « déchets verts » on entend déchets de jardins municipaux ou privés, d'entreprises liées à l’entretien d’espaces verts. Ils peuvent être constitués de tontes de gazon, de la taille de haies, de branches d’élagage, de feuilles mortes et de fleurs mises au rebut.

Figure 8 : Déchets reçus par la plate-forme de compostage

On observait, au début des années 1990, une dizaine de sites de compostage des déchets verts. On estimait leur nombre en 2000 à 280 plates-formes produisant plus de 900 000 tonnes de compost (source : ADEME). On peut distinguer plusieurs étapes dans le procédé de compostage : une première phase correspond à la réception avec un stockage sur une courte durée des matières premières. Elle est suivie d'une phase de préparation des produits ou de pré traitements qui permettent d'obtenir une composition optimale pour les transformations biologiques (broyage pour les déchets verts).

Figure 9 : Broyeur de déchets

Après ces pré-traitements, démarre vraiment le compostage avec une phase de fermentation au cours de laquelle la matière organique est dégradée et recombinée. A cette phase de fermentation, succède une phase de maturation qui peut être précédée ou pas d'un affinage ou d'un criblage (post traitement) permettant d'atteindre la granulométrie souhaitée en fonction de l'utilisation prévue du compost. Le compost peut ensuite être mélangé à d'autres produits à des fins d'utilisation commerciale. Il est ensuite conditionné et stocké. La préparation varie selon la nature des déchets et leur éventuel mélange avec des produits non compostables. Elle consiste à effectuer :

- Un tri manuel ou un tri mécanique (criblage) granulométrique ou densimétrique pour certains déchets comme les bio déchets ou les ordures ménagères,
- Un broyage qui peut être nécessaire en particulier pour les déchets verts voir les déchets fermentescibles,
- Éventuellement une méthanisation (transformation biologique en milieu anaérobie qui permet dans certaines conditions d'assurer la stabilisation et parfois l'hygiénisation de la matière organique fermentescible)
- Un mélange avec un agent structurant (copeaux de bois, sciure…) dans la plupart des cas pour obtenir la structure adéquate.

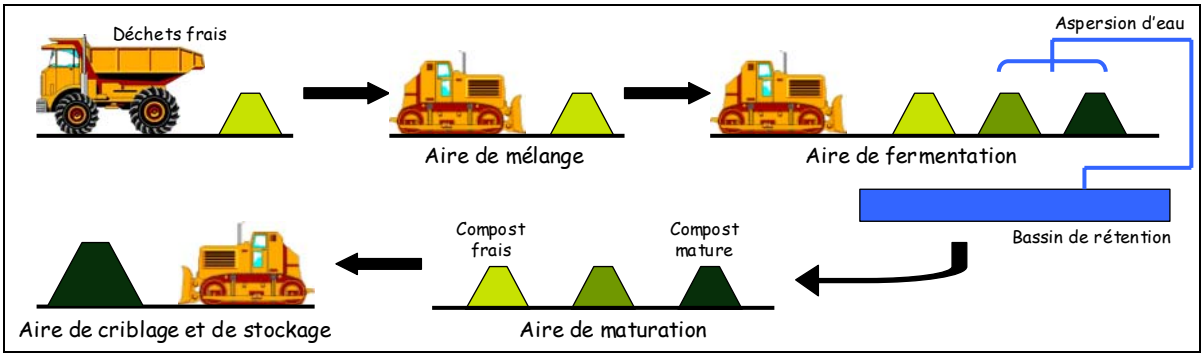


Figure 10 : synoptique du compostage lent à l'air libre

Il existe de nombreuses techniques de compostage (140 brevets à l'échelle européenne). On peut cependant les regrouper en fonction des critères suivants :

- Le type de système : ouvert ou clos,
- Le mode d'aération
- Le type de structure du lot de fermentation.

Figure 11 : Compost arrivé à maturité

En France, l'utilisation des composts se fait aujourd'hui dans divers cadres réglementaires que sont l'homologation, la normalisation et le plan d'épandage. Les principales voies d'utilisation des produits compostés sont :

- L'utilisation en agriculture (grandes cultures, cultures légumières, et fruitières)
- L'utilisation en horticulture ou en jardin amateur en entrant de façon minoritaire dans la formulation de certains supports de culture (terreaux) ou amendement organique commercial (compost de déchets verts),
- L'utilisation en reconstitution du sol ou revégétalisation pour espaces verts ou sites dégradés (centre d'enfouissement technique, friches industrielles),
- L'utilisation en mélange avec d'autres produits pour la fabrication d'engrais organiques ou organo-minéraux.

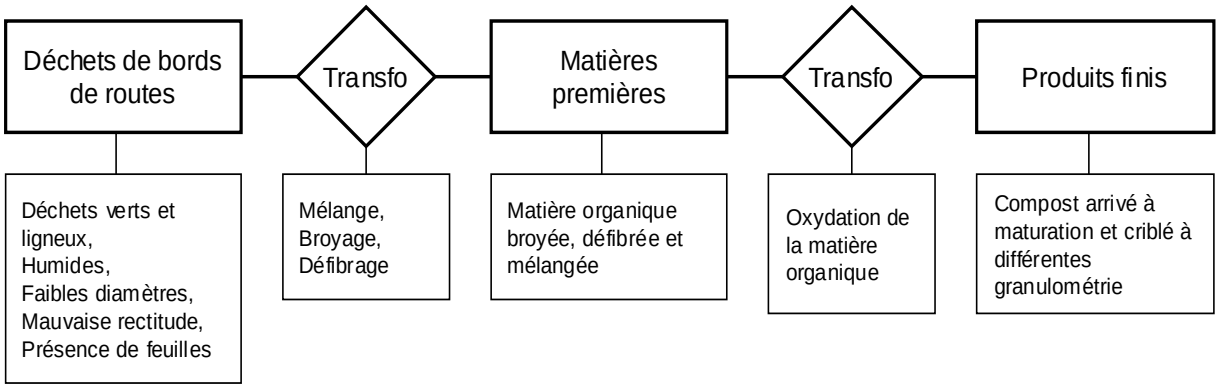

Déchets de bords de routes
Transfo
Matières premières
Transfo
Produits finis
Déchets verts et ligneux, Humides, Faibles diamètres, Mauvaise rectitude, Présence de feuilles
Mélange, Broyage, Défibrage
Matière organique broyée, défibrée et mélangée
Oxydation de la matière organique
Compost arrivé à maturation et criblé à différentes granulométrie

Figure 12 : Process du compostage

On estime à environ 20€/tonne le coût de traitement des déchets verts par compostage pour une revente à environ 30€ la tonne. Ces coûts sont dus à la surface mobilisée, à la manutention des tas etc. (source : ADEME].

1.4 Le bois énergie

L'exploitation forestière, l'élagage et le défrichage produisent un grand nombre de branches et résidus qui peuvent être déchiquetés pour l'alimentation de chaufferies automatiques. Il en est également de

même pour les déchets de bords de route. La fabrication des plaquettes peut se faire sur chantier à l'aide de broyeurs mobiles plus ou moins gros, sur bois frais (60% d'humidité) ou ayant séché sur place (30% d'humidité). Il faut environ 2 ou 3 mois de séchage dans de bonnes conditions. Afin de les faire sécher, on les entrepose à l'air libre sur une plate forme durant quelques mois. Cette opération a un coût mais permet à la plaquette de prendre de la valeur énergétique et donc économique.

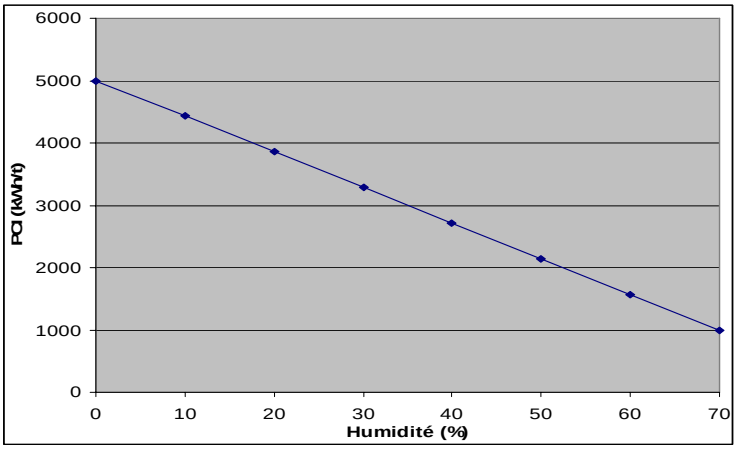


Figure 13 : Perte en valeur énergétique d'une plaquette due à l'augmentation de l'humidité [ITEBE]

En effet, une tonne de plaquette forestière à 40% d'humidité relative à un contenu énergétique de 2500 kWh/tonne contre 3900 kWh/t pour une humidité de 20%. Sur le marché des produits énergétiques, la valeur marchande d'une plaquette est déterminée par son PCI (Pouvoir calorifique Inférieur), c'est à dire la quantité de chaleur qu'elle dégagera lors de sa combustion.

Le potentiel énergétique d'un combustible se définit par son PCI (pouvoir calorifique inférieur). Le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de masse ou de volume de celui-ci. Le pouvoir calorifique varie beaucoup en fonction de l'humidité du combustible. Plus le produit est humide, plus son PCI est faible. Concernant le bois, quelles que soient les essences et sa nature, le PCI est sensiblement le même à taux d'humidité égal. Les plaquettes séchées, puis calibrés sont vendues aux clients possédant une chaufferie. Les plaquettes fines (de l'ordre de 3*2*1 cm) et sèches sont utilisées dans des petites chaudières automatiques dans des maisons individuelles ou des petits réseaux de chaleurs de plusieurs logements alors que les plaquettes plus grosses, souvent humides sont plutôt réservées aux chaudières industrielles de grandes puissances.

Figure 14 : Extraction des déchets bois, Elagage, Broyage, Transport, Stockage

Le prix de vente généralement pratiqué est en général de 30 à 85€ la tonne, directement fonction de l'essence, du calibrage et de l'humidité (tarif moyen qui ne cesse de grimper recueilli auprès des revendeurs).

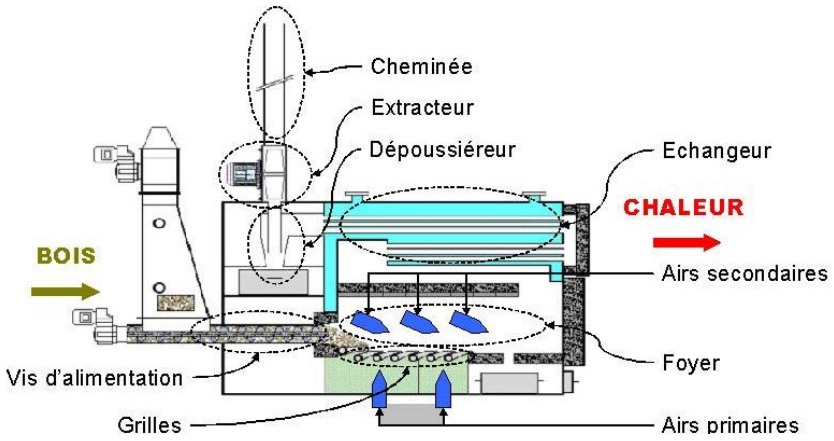


Figure 15: Présentation générale d'une chaudière à bois automatique

Il existe d'autres combustibles bois, mais ceux-ci ne nous intéressent pas pour le moment car ils ont été conçus pour une granulométrie de matière première donnée. Par exemple, le granulé a été créé pour la sciure issue de la deuxième transformation du bois et si nous voulons broyer nos produits en sciures, cela représentera un surcoût par rapport aux plaquettes. Face à des entreprises qui produisent naturellement de la sciure, nous ne serons pas compétitifs.

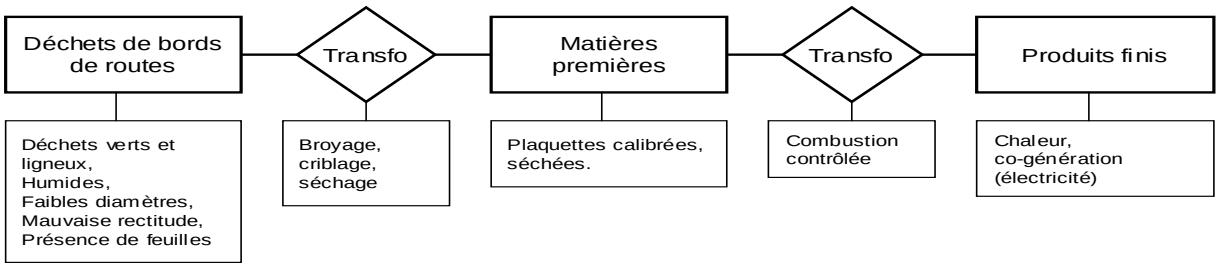


Figure 16 : Process du bois énergie

1.5 La litière, le paillage et l'absorbant industriel

Ce sont des valorisations souvent oubliées mais qui sont toujours importantes pour revaloriser les sous produits bois. Pour la litière, on utilise les propriétés absorbantes du bois afin d'absorber les déjections animales et donc de limiter les effets de l'environnement. De plus, le fumier issu du mélange des particules de bois et des déjections animales se décompose progressivement pour former un compost intéressant pour l'épandage. Les déchets utilisés sont en général des essences résineuses (pins, sapin, douglas…), la granulométrie est faible et l'humidité aussi et la quantité consommée par an est de 165 000 tonnes. Le paillage, ou « mulching » (paillage avec des copeaux de couleur), permet de valoriser des déchets humides organiques tels que la paille, les feuilles mortes ou l'herbe. Les objectifs sont d'isoler le sol du froid ou de la chaleur, limiter l'érosion, empêcher le développement des mauvaises herbes, réguler l'humidité et contribuer à l'esthétique. Les essences recherchées n'ont peu d'importante ainsi que la granulométrie et l'humidité, par contre, la régularité et l'homogénéité des copeaux sont importantes. L'absorbant industriel, comme pour la litière animale, nécessite des propriétés absorbantes du bois, en effet, de fines particules (entre 0,5 et 2mm) sèches (entre 10 et15%) peuvent avoir une capacité d'absorption de 400%.Tonnage : entre 8 000 et 10 000 tonnes par an.

Nous nous sommes rendu compte de plusieurs choses dans ce rapport : certes, les déchets générés par l'entretien des routes et des paysages ne possèdent que peu de valeurs marchandes ; mais les valorisations existent et cette faible valeur devient alors un atout pour le contexte économique actuel. Certaines valorisations paraissent plus envisageables que d'autres, mais les possibilités sont énormes lorsque l'on sait qu'il y aurait non loin de 4 millions de tonnes de produits connexes bois issus des haies en France. Le bois énergie, avec le compostage et le paillage, sont les filières de revalorisation des déchets de bords de route les plus prometteuses sur un avenir proche. Ce sont elles qui acceptent le mieux ce type de produits, ne nécessitant pas de trop lourdes transformations et acceptant des volumes importants. Selon l'ADEME, ce sont plus de 93% des produits connexes bois qui sont valorisés à l'échelle nationale. Parmi les 7% qui reste, on retrouve (et il ne sont pas les seuls) les déchets issus de l'élagage de bord de route, qui, pour le moment sont laissés sur place, ne profitent à personne et se décomposent en produisant des gaz à effets de serres…

Annexe 2. LA FILIERE BOIS-ENERGIE

A la suite du premier rapport, la filière bois énergie a été désignée comme voie de valorisation principale des déchets de haies. Dès lors, l'entreprise avait besoin de renseignements supplémentaires sur cette filière, que ce soit de façon générale, mais aussi sur l'approvisionnement en combustible, le matériel de collecte, le transport, le séchage. Cet annexe est également un rapport remis à l'entreprise pour répondre à ces questions.

2.1 Généralités sur la filière

La plupart des chiffres suivants sont tirés d'une étude effectuée par Biomasse Normandie, en 2003, qui traite du bois énergie en France. Le bois énergie dispose de trois domaines d'application qui représentent une consommation finale d'énergie de 9 MTEP par an (environ 40 millions de m^3 équivalent bois rond):

- Le chauffage domestique ; on estime que, en France, un foyer sur deux est équipé d'un système de chauffage au bois à bûches ou à particules.
- Le chauffage collectif qui possède deux logiques bien différentes : les chaufferies de taille moyenne (de 200 kW à 1 MW) et les plus grosses.
- Le chauffage dans l'industrie qui est en légère croissance avec 1000 installations au total. Il s'agit souvent de retraitement des propres déchets de l'entreprise.

2.1.1 Un combustible propre et abondant :

L'arbre, durant sa croissance, absorbe le gaz carbonique de l'atmosphère, rejette de l'oxygène et stock le carbone sous forme de matière ligneuse. C'est la photosynthèse qui fait que la forêt gérée convenable est un « puit de carbone ».

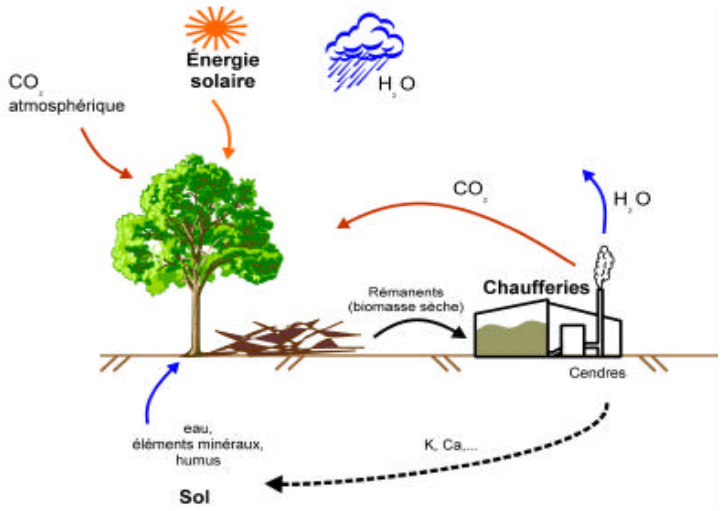


Figure 17 : Cycle simplifié du carbone (source : biomasse normandie)

De plus, le bois n'est pas inerte : lors de sa dégradation en milieu naturel, il retourne à l'état gazeux (CO_2, CH_4…). Sa valorisation énergétique correspond à la maîtrise technologique de ce processus

avec production de chaleur. En France, la ressource en bois représente, chaque année, plus de 110 millions de tonnes dont la moitié n'est pas valorisée. Les déchets de bords de route font partie intégrante de cette biomasse non revalorisée, la fabrication d'une machine de récupération des produits d'élagage permettant de participer à l'avancement de la filière.

2.1.2 Des équipements de chauffage fiables et performants

Grâce à des gros progrès techniques, les constructeurs de chaudières bois fabriquent des matériels garantissant des rendements comparables aux chaudières gaz ou fioul. Grâce aux silos et aux automates, les systèmes sont totalement automatisés. Un système de chauffage automatique peut être caractérisé par ces constituants :

- Le stock et l'amenage du combustible
- Le foyer de combustion
- L'évacuation des fumées et l'échangeur de chaleur

2.1.3 Compétitivités financière et fiscale

Jusqu'à quelques années, les énergies fossiles étaient considérées comme les plus compétitives. Mais l'augmentation des prix du pétrole et de ses dérivés fait que la biomasse devient de plus en plus intéressante. Dans le cadre d'une chaufferie bois, le combustible ne représente que 30% des coûts de chauffage contre près de 80% pour les énergies fossiles. Le faible coût du combustible permet de compenser les coûts plus importants d'amortissement et d'exploitation des équipements. Ce qui fait réellement pencher la balance, ce sont les subventions à l'investissement (40 à 70% selon les régions et les investissements).

2.2 Synoptique détaillé de l'approvisionnement en plaquettes forestières

Les logistiques de plaquettes forestières principalement rencontrées en Europe se distinguent en deux catégories : les logistiques en flux tendus et les logistiques en avec rupture de charge.

2.2.1 Les logistiques en flux tendus (direct)

Ici encore, il existe deux solutions existantes :

- Le bois est transformé en plaquettes en forêt et directement transporté chez l'utilisateur : Cette logistique est bon marché car elle comporte un minimum de manutention, de transport et ne prévoit pas de zone de stockage. L'inconvénient est que les plaquettes sont livrées humides à plus de 50% d'humidité sur brut.

1. Abattage
2. Déchiquetage sur coupe avec une automotrice équipé d'une benne élévatrice
3. Transport et livraison de bord de route de a la chauffene

Figure 18 : Production de plaquettes en forêt et flux direct

- Le bois est transformé en plaquettes sur le bord de la route et transporté chez l'utilisateur :

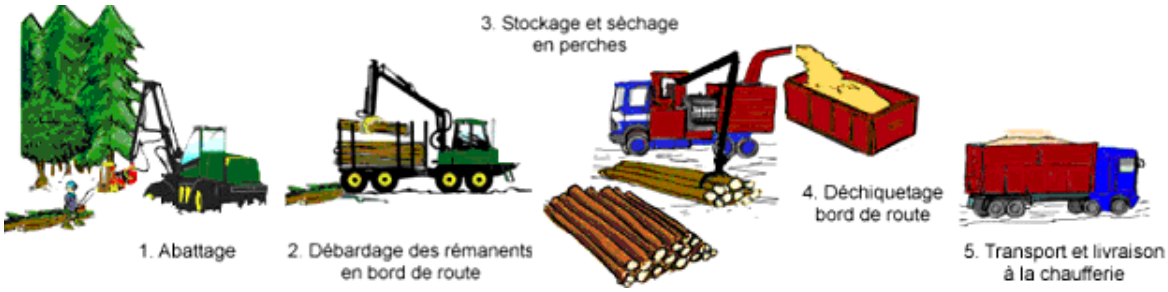

3. Stockage et séchage en perches
1. Abattage
2. Débardage des rémanents en bord de route
4. Déchiquetage bord de route
5. Transport et livraison à la chaufferie

Figure 19 : Production de plaquettes sur bord de route et flux direct

Cette logistique, comme la précédente, ne prévoit pas, en dehors du bord de route, de zone de stockage intermédiaire. Ici, les plaquettes livrées sont toujours humides même si le bois peut avoir le temps de ressuyer sur le bord de la route.

2.2.2 Les logistiques avec rupture de charge (indirect)

Dans ce cas là, une zone de stockage intermédiaire est prévue afin de faire sécher les plaquettes forestières. Les plaquettes sont fabriquées soit en forêt, à l'entrepôt intermédiaire.

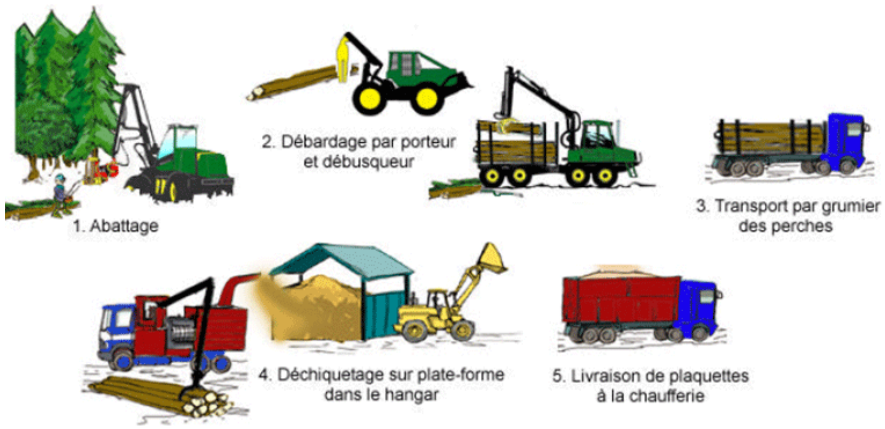

1. Abattage
2. Débardage par porteur et débusqueur
3. Transport par grumier des perches
4. Déchiquetage sur plate-forme dans le hangar
5. Livraison de plaquettes à la chaufferie

Figure 20 : Production de plaquettes sur plate-forme et flux indirect

L'approvisionnement indirect est plus cher car il nécessite d'avantage de stockage et de manutention. En revanche, les plaquettes peuvent être séchées et cela permet un meilleur pouvoir calorifique du

combustible ainsi qu'une bonne sécurité d'approvisionnement de celui-ci. Lorsque l'on broie les plaquettes en dehors de la forêt, le faible coefficient de foisonnement des branches de houppier pose problème. En effet, les transporter en l'état coûterait trop cher, c'est pourquoi, les houppiers sont compactés en ballots, puis transportés et enfin broyés.

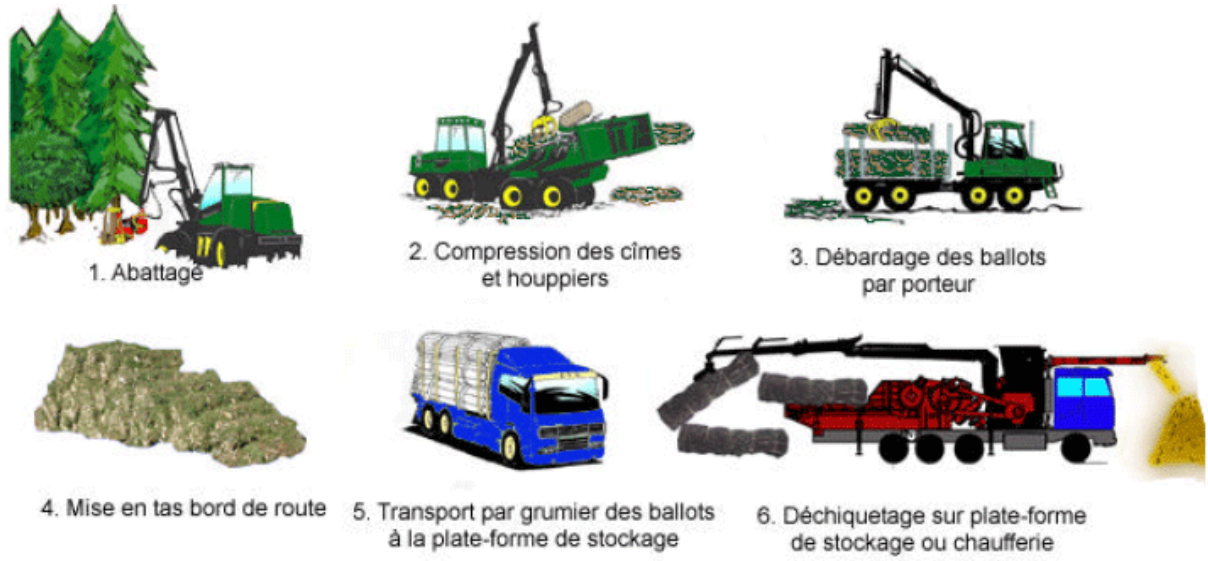

1. Abattage
2. Compression des cîmes et houppiers
3. Débardage des ballots par porteur
4. Mise en tas bord de route
5. Transport par grumier des ballots à la plate-forme de stockage
6. Déchiquetage sur plate-forme de stockage ou chaufferie

Figure 21 : Production de plaquettes sur plate-forme à partir de houppiers compactés

La dernière possibilité est du broyer les plaquettes en bord de route et de les transporter en lieu de stockage.

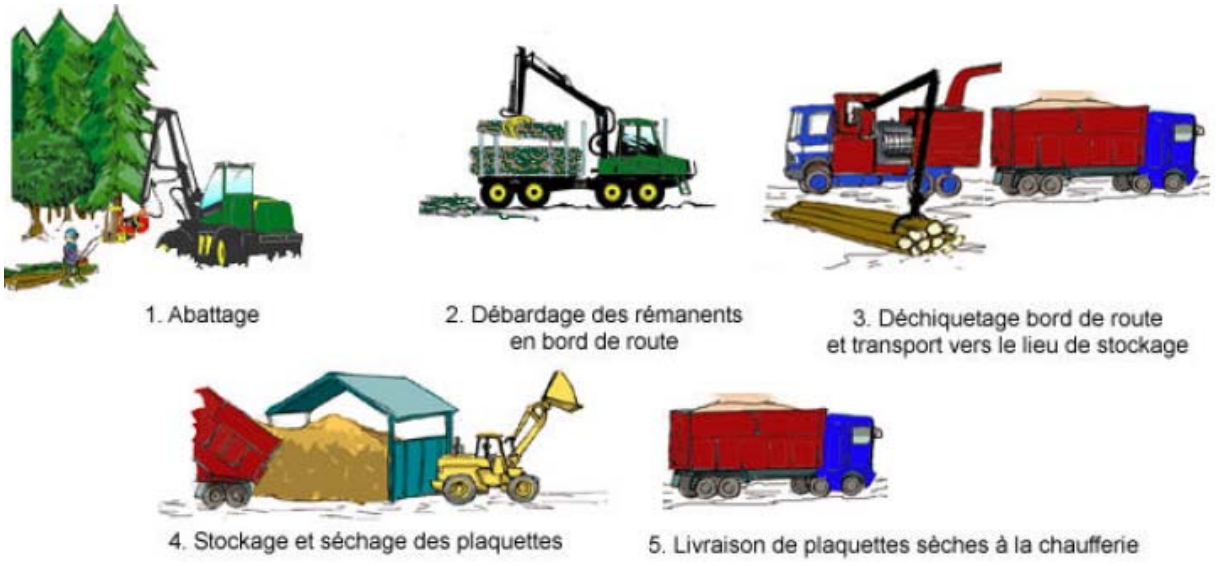

1. Abattage
2. Débardage des rémanents en bord de route
3. Déchiquetage bord de route et transport vers le lieu de stockage
4. Stockage et séchage des plaquettes
5. Livraison de plaquettes sèches à la chaufferie

Figure 22 : Production de plaquettes en bord de route et flux indirect

2.3 Le matériel de collecte

Les différentes étapes du processus sont :

- L'abattage, le façonnage et le débardage

- Le déchiquetage
- Le transfert des plaquettes sur véhicules (automatiquement ou mécanisé)
- Le transport
- Le chargement

Les différentes étapes du process ne sont pas obligatoires et vont dépendre du système d'approvisionnement que l'on aura choisi.

2.3.1 L'abattage, le façonnage et le débardage

L'abattage et le façonnage sont deux opérations différentes qui aboutissent aux produits destinés au broyage. On distingue l'abattage mécanisé (abatteuse) du manuel (tronçonneuse). Le débardage consiste à évacuer les produits jusqu'en bord de route par des techniques de portage : soit mécaniques (treuil sur tracteur, débusqueuse, porteur forestier), soit plus traditionnel (humain ou chevaux).

Figure 23 : Débardeuse John DEERE Forestry

2.3.2 Le déchiquetage

L'opération de déchiquetage consiste à découper les plaquettes de bois et de les calibrer en partant des produits issus de l'abattage et du façonnage.

2.3.3 L'alimentation en bois

Il existe plusieurs systèmes d'alimentation qui se différencient par la position de la trémie, par le dispositif d'entraînement des perches et par le mode d'alimentation. La trémie de chargement peut être latérale ou frontale par rapport à l'axe de progression de l'engin ou peut être mixte, c'est-à-dire réglable dans l'une ou dans l'autre des deux positions. En ce qui concerne l'entraînement du bois, peut se faire par rouleaux à picots ou dispositifs d'amenage à chaînes. Sur certaines machines, plus simples, une goulotte inclinée permet l'alimentation par gravité. L'alimentation en bois de la déchiqueteuse peut se faire manuellement pour un broyage occasionnel ou par grappin monté sur bras hydraulique pour une utilisation plus intensive.

2.3.4 Capacité de broyage

La principale caractéristique qui différencie les déchiqueteuses est leur capacité de broyage. Plus cette capacité sera importante, plus les bois acceptés seront de gros diamètre et plus le broyeur nécessitera de puissance.

2.3.5 Les petits broyeurs de jardinage

Ces petits broyeurs sont utilisés par les particuliers ou les paysagistes afin de réduire en plaquettes des branchages pouvant aller jusqu'à 5 cm de diamètre. On les trouve dans les GSB (Grandes Surfaces de Bricolage) ou les jardineries.

2.3.6 Les broyeurs d'entretiens forestiers et de bords de route

Ces broyeurs sont de capacités beaucoup plus importantes et leur investissement est alors beaucoup plus conséquent. Ils peuvent atteindre des chargements de bois de 40 cm de diamètre et une production de 40 MAP/h. Le coût horaire de ce type de machine est de l'ordre de 70€ de l'heure pendant la phase de broyage. La transmission de la puissance sur l'organe de coupe peut se faire de deux manières différentes : par la prise de force d'un tracteur agricole ou par un moteur indépendant.

Figure 24 : Broyeur de branche actionné par la prise de force d'un tracteur

Ces petites machines sont appréciées pour leur légèreté, leur faible coût et leur disponibilité. Malgré tout, ce sont des machines peu manoeuvrantes. Le coût de ce matériel s'échelonne entre 5 000€ et 40 000€ H.T.

Figure 25 : Broyeur de branche actionné par leur propre moteur

Actionnés par leur propre moteur, ces broyeurs sont plus mobiles et ne nécessite pas de prises de force (ils sont simplement tractés). Malgré tout, ils sont plus onéreux puisque le coût de ce matériel s'échelonne entre 20 000€ et 90 000€ H.T. Et on estime, qu'à capacité égale, ce type de matériel coûte deux fois plus cher qu'un broyeur monté sur un attelage trois point d'un tracteur agricole. Ce type de matériel concerne les structures professionnelles (entrepreneurs, CUMA…).

2.3.7 Les broyeurs de fortes capacités à alimentation mécanique

Ce sont en général des broyeurs de plus grosses capacités pouvant atteindre un rendement de 10 à 130 MAP/h de production de plaquettes. De plus, le coût horaire diminue par rapport aux broyeurs précédents : de l'ordre de 55€/heure de broyage car ils sont souvent fixes (ou se transportent très peu) et possèdent une forte inertie mécanique. Contrairement aux précédents qui utilisaient des systèmes à couteaux, la plupart de ces engins, utilisent des systèmes à marteaux ou fléaux. Le coût de ce type d'appareil augmente encore pour atteindre de 50 000 à 300 000€ H.T.

Figure 26 : Broyeur de déchets verts pour le compostage

2.3.8 Les grosses déchiqueteuses montées sur porteur forestier

Ce ne sont pas les machines offrant les plus grosses capacités de broyage, mais la meilleure mobilité. Elles ont en générale une capacité de stockage intégrée peuvent se déplacer en forêt assez facilement. Le coût de ce type de matériel est compris entre 300 000€ et 500 000€ H.T.

Figure 27 : Déchiqueteuse automotrice SILVATEC

Malgré l'importance de leur investissement, ces déchiqueteuses possèdent des capacités impressionnantes, pouvant broyer des bois de 60 cm de diamètre, pour une production allant jusqu'à 70 MAP/h. L'utilisation d'un tel engin réclame un coût horaire de l'ordre 150€ de l'heure. Ce type de machine est adapté aux grosses productions des coopératives forestières sur des surfaces conséquentes. Les pays scandinaves utilisent beaucoup ce matériel. Il est malheureusement plus rare sous nos latitudes.

2.4 L'approvisionnement des plaquettes

2.4.1 Le transport

Les matériels existants, utilisés dans le transport des plaquettes du lieu où elles sont produites vers leur lieu de stockage ou d'utilisation, sont nombreux et la liste suivante est non exhaustive. Les engins de transport sont en général triés en fonction de leur capacité de transport :

- Tracteur et remorque agricole : 15 m3

- Camion porteur et conteneurs : 2 ou 3 fois 35 m3. Les conteneurs permettent de ne pas immobiliser les camions lors du chargement des plaquettes. En effet, le remplissage des plaquettes peut se faire dans un conteneur sans camion, être entreposé sur le bord de la route, puis chargé et emmené par le camion plus tard.

- Camion semi-remorque à benne basculante : 70 m3. Ce type de transport est en général utilisé pour des livraisons sur courtes distances. Leur hauteur de bennage varie de 2,5 à 4 mètres.

- Camion semi-remorque à fond mouvant : 90 m3

- Camion à chargement pneumatique : camion souffleur. Ce type de camion fonctionne mieux avec des combustibles secs (granulés, plaquettes sèches). Faute de quoi, il existe des risques de colmatage et de bourrage.

2.5 Stockage et séchage

En général, les branches sont regroupées en tas avant d'être broyées afin de commencer à faire sécher le bois. De plus, l'opération de déchiquetage sera alors plus organisée et la productivité du chantier grandement améliorée. Une fois broyées, les plaquettes peuvent être stockées et séchées en extérieur ou sous abri. Le séchage permet d'amener l'humidité des plaquettes de 60% sur brut (humidité au moment de l'abattage) à celle du cahier des charges.

2.5.1 Stockage et séchage des plaquettes en extérieur

Cette technique de stockage ne fonctionne que pour des volumes de plaquettes importants (supérieur à 2000 m^3), car il s'agit de fabriquer une couche étanche superficielle sur le tas (10 à 30 cm de profondeur). De la sorte, les plaquettes plus en profondeur sèchent de manière contrôlée pendant

plusieurs mois. Pour les volumes de plaquettes plus petits, des systèmes de bâches spécifiques existent afin de jouer le rôle de la « croûte étanche ».

Figure 28 : Stockage de plaquettes en extérieur et sous bâche

2.5.2 Stockage et séchage des plaquettes sous abri

Le fait de stocker les plaquettes sous abri, permet un séchage plus rapide ainsi que d'autres opérations sur celle-ci : la réception, le contrôle, le pesage…

Figure 29 : Stockage et séchage des plaquettes sous abris

Annexe 3. LES PROPRIETES PHYSIQUES DES PLAQUETTES DE CHAUFFAGE

Dans le but de répondre au cahier des charges des chaudières automatiques à bois, l'entreprise NOREMAT a souhaité développer ces compétences sur les combustibles bois. Il existe une série de paramètres physiques à mesurer et à surveiller afin de répondre à ce cahier des charges. Cet annexe est un rapport fourni à l'entreprise dans ce but.

3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est, comme son nom l'indique le rapport entre la masse apparente de bois et le volume apparent de cette masse. La norme française NF B51-005 (source: AFNOR) donne les détails de ce calcul : on distingue la masse volumique apparente Anhydre (à 0% d'humidité) qui dépend uniquement du matériau mesuré et la M.V.A Humide qui dépend également de l'humidité. Pour les plaquettes forestières, la masse volumique est toujours humide et l'humidité doit être précisée : $m_{VH}=\frac{m_H}{V_H}$

- m_H est la masse en kilogrammes, de l'échantillon à l'humidité H.
- V_H est le volume en mètre cube, de l'échantillon à l'humidité H.

La masse volumique apparente des combustibles livrée sur les sites de chauffage tourne aux alentours de 300 kg/m^3 (moyenne constatée entre les valeurs établies et les valeurs mesurées sur site).

3.2 Degré d'humidité et énergie contenue

L'humidité joue un rôle déterminant dans la caractérisation des plaquettes : plus le produit est sec, plus le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est élevé (Figure 30). Le PCI est l'énergie résultant de la combustion de la plaquette en tenant compte de l'essence et de l'humidité du combustible.

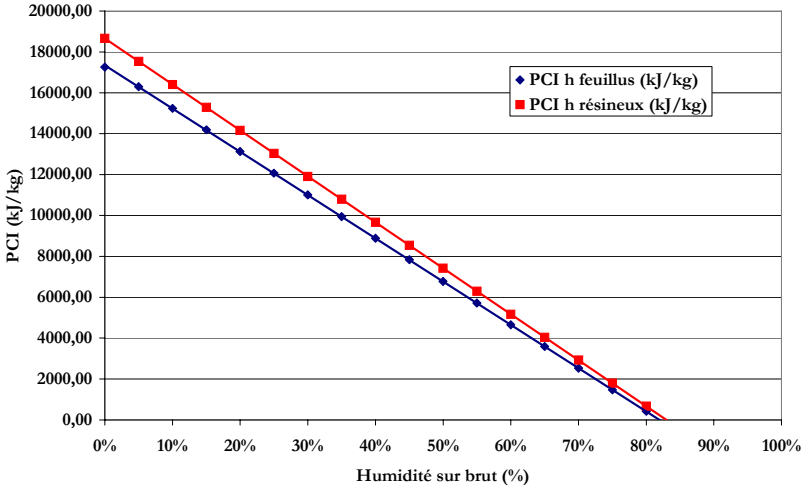


Figure 30 : Evolution du pouvoir calorifique inférieur des plaquettes en fonction de l'humidité sur brut

3.3 L'humidité sur brut du combustible

La quantité d'eau contenue dans le bois se mesure relativement à la masse de bois anhydre et humide. Ainsi, l'humidité peut être évaluée comme le rapport de la masse d'eau sur la masse de bois humide. Il s'agit alors de l'humidité dite sur brut, notée H_b : $H_b = \frac{m_{bois.humide} - m_{bois.anhydre}}{m_{bois.humide}} x100$

- $m_{bois.humide}$ est la masse de bois humide en kg ;
- $m_{bois.anhydre}$ est la masse de bois humide en kg ;
- H_b est l'humidité sur brut.

L'humidité d'un bois est définie et mesurable grâce à la norme française NF B 51-004 :

- Peser l'éprouvette dont on souhaite mesurer l'humidité,
- Déshydrater l'éprouvette dans une étuve ventilée à 103°C jusqu'à stabilisation de sa masse,
- Peser l'éprouvette sèche rapidement pour éviter toute reprise d'humidité.

L'humidité, en plus d'avoir des conséquences sur la combustion, en a aussi sur le broyage : lorsque le bois est sec, il est plus cassant et l'on a moins de queue de déchiquetage mais les couteaux s'usent plus vite car le bois est plus dur. Généralement, le cahier des charges d'approvisionnement de ces plaquettes définit des limites pour l'humidité du combustible : entre 20 et 30% sur brut (source : HARGASSNER). Pour information, les plaquettes, lorsqu'elles viennent d'être coupées peuvent dépasser les 60% sur brut. Il faut donc les sécher afin d'enlever l'eau qu'elles contiennent.

3.4 Le pouvoir calorifique inférieur

3.4.1 Pouvoir Calorifique Inférieur

D'après la norme française M 03-005, le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) est « la quantité de chaleur, dégagée par la combustion complète de l'unité de masse du combustible, l'eau demeurant à l'état de vapeur et les autres produits de la combustion étant ramenés à la température initiale fixée à 25°C, il est plus directement utilisable dans les conditions normales de combustion. » Plus simplement, le PCI est l'énergie résultant de la combustion de la plaquette en tenant compte de l'essence et de l'humidité du combustible. Le principe de la mesure est de brûler un échantillon de combustible à l'intérieur d'une bombe calorimétrique, entouré d'un fluide caloporteur (eau en général). Lors de la combustion complète de l'échantillon, la température du fluide augmente. A partir de cette augmentation de température, en tenant compte des pertes thermiques, une quantité d'énergie est calculée. A cela vient s'ajouter un calcul d'humidité qui vient ponctuer le pouvoir calorifique.

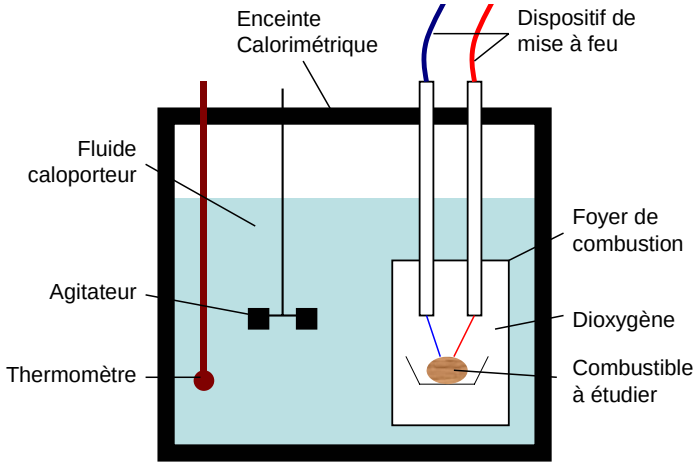


Figure 31 : Schéma de fonctionnement d'une bombe calorimétrique

Le pouvoir calorifique n'est pas toujours précisé sur les cahiers des charges de livraison des combustibles. Le fait qu'un combustible ne soit pas très calorifique, n'empêche pas la chaudière de fonctionner mais en réduit considérablement l'efficacité. La contenance énergétique d'un combustible ne dépend pas de sa granulométrie mais beaucoup plus de l'essence de bois et de son humidité.

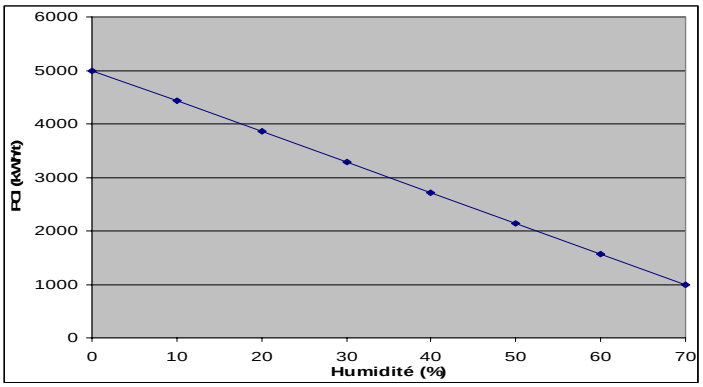


Figure 32 : Evolution du PCI d'un combustible avec son humidité

Le PCI moyen des combustibles à l'entrée des chaudières est de 2500 à 3000 kWh/tonne.

essence	PCI anhydre en kJ/kg
Mélèze	19440
Pin maritime	19260
Pin sylvestre	19260
Sapin	19152
Douglas	19044
Epicéa	18936
Acacia	18972
Chataigner	18684
Orme	18612
Hêtre	18504
Frêne	18324
Chêne	18144

3.5 Granulométrie

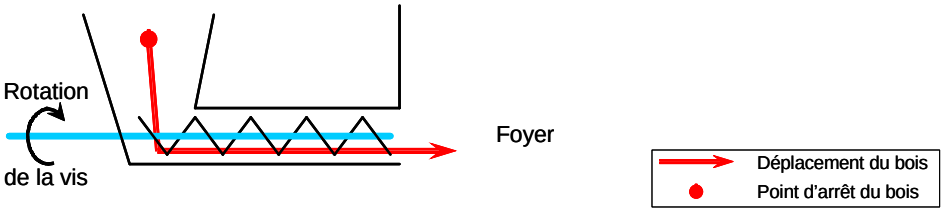
La granulométrie d'un volume de plaquettes correspond aux dimensions moyennes du solide que constitue la plaquette. Plus simplement, elle définie la taille des plaquettes et permet ainsi de choisir la technologie d'appareil de chauffage la mieux adaptée pour l'alimentation et la combustion.

Pour les grosses chaufferies (chaufferies industrielles), de puissance supérieure à 300 kW, les plaquettes utilisées peuvent faire jusqu'à 10cm de longueur pour une section de 5*5cm au plus. Les petites chaudières (chaudières individuelles), quant à elle, n'acceptent que des plaquettes calibrées à des cubes de 20*20mm de section pour une épaisseur de 5mm. Cette différence est en général due aux systèmes d'alimentation et de combustion de ces chaudières.

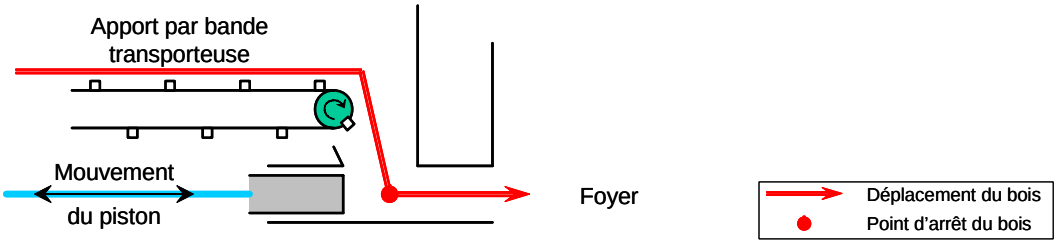
Figure 33 : A gauche : Plaquettes pour chaudières individuelles, A droite : pour chaudières industrielles

La granulométrie est une des caractéristiques du combustible la plus importante car elle détermine le système d'alimentation du foyer de la chaudière. L'alimentation mécanique en bois fragmenté peut être effectuée de trois façons différentes (source : Claude BERNARD):

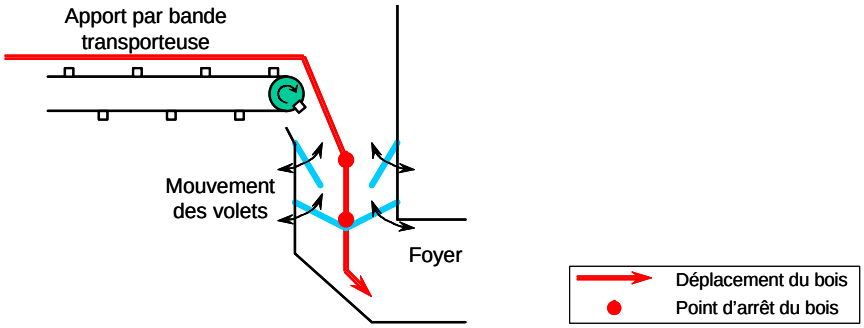
- par vis d'Archimède mue par motoréducteur et moteur électrique :



- par tiroir mu par un vérin hydraulique souvent alimenté par bande transporteuse :



- par gravité via une antichambre permettant également une alimentation par bande transporteuse :



La solution la plus économique, et par conséquent la plus courante, est l'alimentation par vis d'Archimède. La seule limite à l'utilisation de ce système est la granulométrie du combustible : la vis d'Archimède ne permet pas de transporter des plaquettes trop grosses. La granulométrie des plaquettes de chauffages n'est pas encore définie par une norme française ou européenne. Pour l'instant, c'est une norme autrichienne (pays fortement en avance sur ce sujet), ÖNORM 7113, qui détermine le protocole à mettre en place. Le principe est de séparer les particules de bois par taille et d'en déterminer la répartition. Il existe plusieurs techniques, mécaniques ou optiques. Le tamis dont nous disposons au sein du laboratoire est un tamis horizontal vibrant. Il est nécessaire de prélever une quantité respectable de plaquette (3-4 kg) et de les passer à travers les différentes grilles. A partir de là, on pèse chaque proportion de plaquettes que l'on met en relation avec la masse totale de l'échantillon. Ainsi on connaît le pourcentage de plaquettes dont la taille est comprise entre deux tamis.

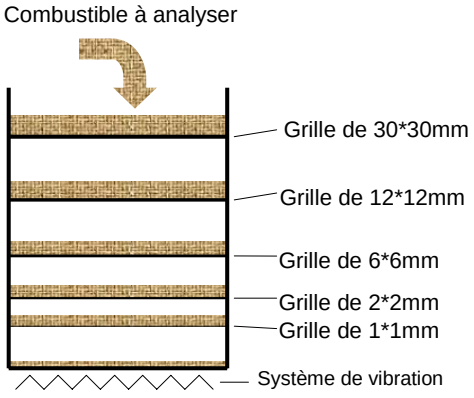


Figure 34 : Schéma de principe de la mesure granulométrique par tamis horizontal vibrant

Il est important, pour le bon fonctionnement des chaudières, qu'une forte proportion de plaquettes ait la même taille. Le cahier des charges des chaudières donne les conditions suivantes : les refus du tamis large réglé sur une ouverture de 16 mm, et les particules qui passent à travers le tamis moyen réglé sur une ouverture de 2 mm, ne doivent pas dépasser la proportion de 20% de la masse totale du bois. Les éléments surdimensionnés doivent avoir une surface maximale de 3 cm^2 et une longueur maximale de

5 cm. Les dimensions idéales qu'il serait préférable de produire avec la machine à concevoir sont les suivantes (Figure 35):

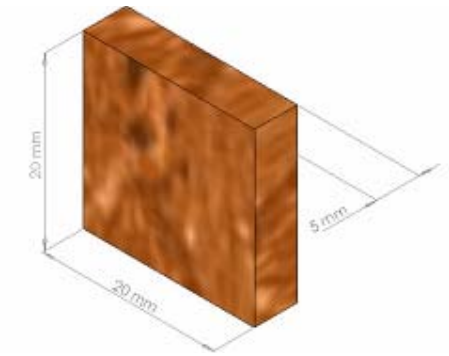


Figure 35 : Dimensions idéales d'une plaquette pour chaudière de particulier [HARGASSNER]

C'est souvent le mode d'alimentation en bois des chaudières qui détermine la granulométrie nécessaire des plaquettes. Toutes plaquettes qui ne rentreraient pas dans ce domaine de granulométrie (tel que les queues de déchiquetage par ex.) pourraient entraîner un mauvais fonctionnement de l'alimentation et de la combustion. Si les utilisateurs de la machine à concevoir souhaitent vendre les plaquettes qu'elle produit, celle-ci doit pouvoir produire un combustible bien calibré.

3.6 Pourcentage de fines particules

Le pourcentage de fines particules représente la part des particules, en masse, dont la granulométrie est inférieure à 1mm. Autrement dit, toute particule passant au travers du tamis de 1*1mm est considérée comme une fine. Elle ne doit pas être trop importante car les fines s'envolent avec les fumées et brûlent mal. En général, on demande que ce taux soit toujours en dessous de 3% de la masse totale de la livraison de combustible.

3.7 Taux de cendres

Les cendres sont des résidus de combustion solides ne comportant plus aucune part combustible. Le bois contient 0,3% à 1% de sa masse anhydre de substances minérales. Malgré ces données, le combustible bois est souvent chargé en minéraux à 1% et plus de sa masse anhydre. Ces cendres sont, en général, évacuées dans un cendrier qu'il faut vider régulièrement. Même si les taux de cendres sont généralement faibles, il devient intéressant d'espacer les vidanges pour les grosses installations de chauffage. Pour demeurer en relation avec les produits forestiers, les déchets de bords de route ne doivent pas générer plus de 2 ou 3% de cendre. L'expérience montre que le taux de cendre augmente de façon significative avec la présence de feuillage et de terre/cailloux. Toujours dans l'optique d'utiliser les plaquettes issus des haies de bord de route, nous obtiendrons de meilleurs taux de cendres en élaguant en hiver (pas de feuillage pour les feuillus) et récupérant directement les branches sans les laisser tomber à terre. Le principe de la mesure est décrit dans la norme française NF M 03-003 et est

le suivant : l'échantillon est incinéré à l'air à une température de 815°C et est maintenu à cette température jusqu'à obtention d'une masse constante.

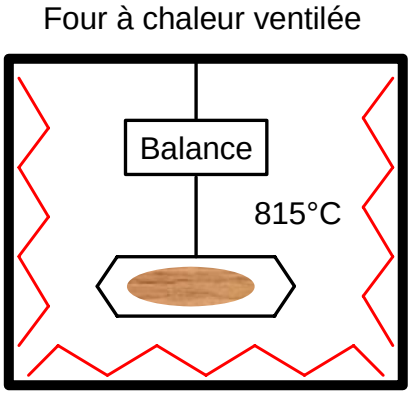


Figure 36 : Installation utilisée pour la mesure du taux de cendre

Une fois le test terminé, nous appliquons la formule suivante afin de calculer le taux de cendres :

$$Taux\_de\_cendres = \frac{Masse\_des\_cendres}{Masse\_initiale\_échantillon} x100$$

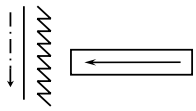
Annexe 4. INVENTAIRE DES OUTILS DE COUPE

A la demande de l'entreprise NOREMAT, j'ai effectué un inventaire, non exhaustif, des outils de coupe présents dans la filière bois, dans le domaine de l'accoroutage et dans d'autre. Cela a permis un classement de ces différents outils, puis le choix du futur concept de coupe.

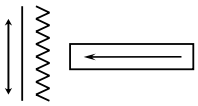
NOTICE D'UTILISATION DE L'INVENTAIRE

La notice a pour but de montrer à l'utilisateur à la classification des différents outils de coupe recensés.

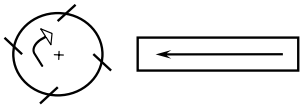
Mouvements relatifs outil/pièce:



Continu linéaire

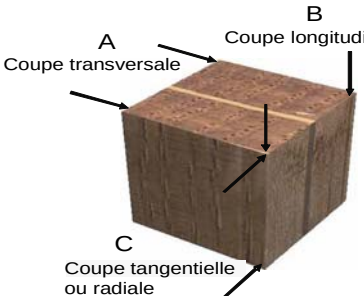


Continu alternatif



Rotatif

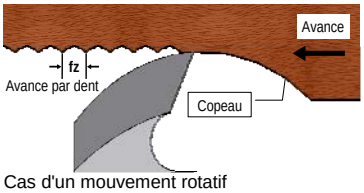
Mode de coupe:



On prend pour hypothèse que la direction générale des branches à couper est horizontal et que les fibres de bois sont suivant cette direction. Dans le cas d'un tronçonnage de la branche (Coupe A) on vient trancher les fibres alors que dans le cas d'un rabotage (coupe B) les fibres sont séparées. Les conditions de coupe sont alors très différentes.

Vitesse de coupe: Le copeau est le résultat de la pénétration de l'outil dans la matière. Il faut donc, pour l'obtenir, créer un mouvement relatif outil-pièce. La vitesse de ce déplacement est appelée vitesse de coupe. Elle est exprimée en mètre par seconde (m/s).

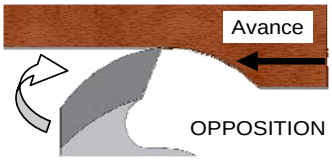
Avance par dent:

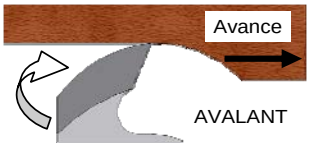


Cas d'un mouvement rotatif

L'avance par dent permet de comparer les performances d'outils entre eux. Elles s'affranchie du nombre de dents, de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance. Plus l'avance par dent est faible, et plus la qualité d'usinage est importante. Elle est exprimée en mm.

Sens de coupe:





Valable uniquement dans le cas d'un outil rotatif

Matériaux: Matériaux généralement utilisés dans la fabrication de l'outil.

Utilisations connues: Liste non exhaustive des domaines d'applications de l'outil.

Fournisseurs connus: Liste non exhaustive des entreprises fabricant ou utilisant ce type d'outil.

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	Note subjective allant de 1 à 5 pour chaque critère	Coefficient d'importance attribué à chaque critère	Tarif moyen ramené à notre CdCF
Disponibilité			Fonct° des fournisseurs, brevets...
Facilité d'adaptation			Adaptation de la technologie aux conditions de coupe
Capacités de coupe			Performances de la coupe
Usure			Tenue moyenne dans les conditions d'accoroutage
Sécurité			Sécurité suivant le CdCF établi
Qualité de coupe			Etat visuel des branches après la coupe
Facilité d'utilisation sur chantier			Utilisation de l'outil sur un chantier d'accoroutage

Chaque note tient compte d'une adaptation à l'entretien des accotements routiers.

Total: **Appréciation finale**

4.1 Inventaire des outils de la filière bois

LAME DE SCIE A RUBAN

Description, particularités: Lame de scie à ruban est un alignement de dents montées sur un lame à mouvement linéaire.

Mouvement: Linéaire continu

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: 25-50 m/s

Avance par dent: mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux: Aciers la plupart du temps, mais possibilité de stellite pour les dents par ex.

Utilisations connues:
En général, les lames de scie à ruban sont utilisées dans la première transformation de la filière bois (scierie) mais aussi pour le tronçonnage métal.

Fournisseurs connus:
FORESTILL

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	4	1	Disponible dans la filière bois
Disponibilité	4	1	Disponible dans la filière bois
Facilité d'adaptation	2	1	Problèmes de tension et de tenu de la lame
Capacités de coupe	3	1	Capacité moyenne, petite et grosse branche
Usure	3	1	Moyenne
Sécurité	4	1	Peu de risque pour les usagers de la route
Qualité de coupe	3	1	Qualité surement moyenne si tenue des branches
Facilité d'utilisation sur chantier	2	1	Problèmes de tension et de tenu de la lame

Observations:
Largeur de coupe: 0.3 à 1 mm. La principale difficulté de cet outil sera de le stabiliser dans l'environnement de coupe de l'accoroutage.

Total: **25**

Lame de scie circulaire

Description, particularités: Dents disposées autour d'un disque en rotation

Mouvement:	Rotatif	
Mode de coupe:	A	
Vitesse de coupe:	30-60	m/s
Avance par dent:	0,17	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:	Corps acier et dents en HSS, carbure, diamant	

Utilisations connues:
Bien connues dans l'industrie du bois pour tronçonner et déligner. Egalement utilisées dans l'accoroutage avec les lamiers.

Fournisseurs connus:
LA FOREZIENNE, LEUCO…

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Réaffutage: 1FR/dent
Disponibilité	4	1	Facile à trouver
Facilité d'adaptation	4	1	Déjà utilisé dans le domaine
Capacités de coupe	3	1	Bonne capacité sauf petit diam.
Usure	3	1	Bonne
Sécurité	1	1	Mauvaise, disque dans l'axe de la route
Qualité de coupe	3	1	Bonne sur grosse branche
Facilité d'utilisation sur chantier	4	1	Bon outil mais dangereux et bruyant

Observations:
Les calculs sont pris pour un tracteur à 2 km/h, lame de diamètre 700mm et 96 dents, 2000 tr/min. Les lames de scies circulaires sont déjà utilisées dans l'élagage de bord de route mais posent un sérieux problème de sécurité. Des accidents sont arrivés sur des chantiers. Largeur de coupe 3 ou 4 mm.

Total: **25**

SCIE ALTERNATIVE

Description, particularités: Sur le principe de la scie sauteuse, une lame proche d'une lame de scie à ruban effectue des aller et retour ce qui provoque la coupe

Mouvement:	Linéaire Alternatif	
Mode de coupe:	A	
Vitesse de coupe:	2 ou 3	m/s
Avance par dent:	0,5	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:	Comme les lames de scies à ruban: corps acier et dents stellites et carbures.	

Utilisations connues:
Découpe de bois et de métaux: parquet, multilame…

Fournisseurs connus:
FOREZIENNE pour les lames; WINTERSTEIGER pour la machine.

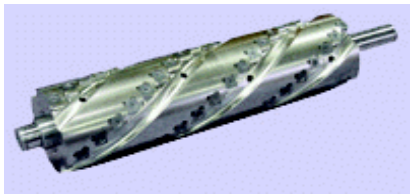
Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Dans le même gamme que les lame de scie à ruban
Disponibilité	3	1	Un peu moins de fabricant
Facilité d'adaptation	2	1	Moins de problème de tensionnage, + stable
Capacités de coupe	2	1	Alternatif=vitesse de coupe plus faible
Usure	3	1	idem lame ruban et circulaire
Sécurité	3	1	idem lame ruban
Qualité de coupe	3	1	idem lame ruban
Facilité d'utilisation sur chantier	3	1	Meilleure tenue de la lame que la ruban

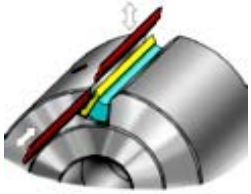
Observations:
Largeur de coupe 1 à 3 mm, les calculs sont pris pour une lame de découpe de parquet
WINTERSTEIGER: 550 coup/min, 250mm de course, avance 2km/h, pas de dents 15mm.

Total: **22**

Rotor à couteaux tranchant

Description, particularités: Il s'agit de reprendre un outil de coupe classique dans le corroyage de pièce bois





Mouvement:	Rotatif	
Mode de coupe:	A	
Vitesse de coupe:	45	m/s
Avance par dent:	8	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:	Corps acier et couteaux acier ou carbure	

Utilisations connues:
Corroyage des pièces bois…

Fournisseurs connus:
Tous les fournisseurs classiques d'outils à bois: GUILLEN, LEITZ, LEUCO…

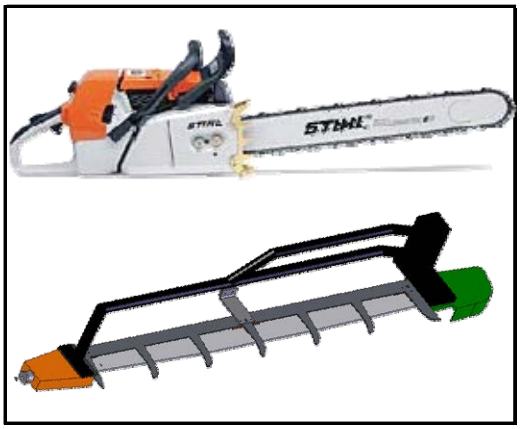
Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	2	1	Matériaux classiques mais massifs
Disponibilité	3	1	Outils disponibles par la filière bois classique
Facilité d'adaptation	4	1	Il suffit de les tester sur les rotors existants
Capacités de coupe	3	1	Efficaces sur petits et gros diamètres
Usure	2	1	Usure importante si outil mal dimensionné
Sécurité	3	1	Idem que les rotors classiques
Qualité de coupe		1	Non encore déterminée
Facilité d'utilisation sur chantier	3	1	Idem que les rotors classiques

Observations:
Il est possible de réutiliser toutes les techniques connues dans la filière bois: plaquettes rapportées, formes hélicoïdales, banc d'essais d'usure…Largeur de coupe: faible. Les calculs sont pris pour un rotor de 30cm, vitesse de rotation de 3000tr/min, 2 dents, 3 km/h d'avance.

Total: **20**

Tronçonneuse

Description, particularités: Reprise de l'outil du bucheron



Mouvement:	Linéaire continu	
Mode de coupe:	C	
Vitesse de coupe:	15	m/s
Avance par dent:	1,3	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:		

Utilisations connues:
La tronçonneuse est utilisée dans la découpe du bois en forêt et en scierie, de la pierre…

Fournisseurs connus:
STIHL, MAKITA, SABRE France…

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Tarifs moyens
Disponibilité	3	1	Beaucoup de fabricants de petits guides
Facilité d'adaptation	4	1	Existe déjà
Capacités de coupe	2	1	Moyenne, nécessité de capter la branche
Usure	3	1	
Sécurité	4	1	Bonne
Qualité de coupe	2	1	Moyenne, vitesse de coupe trop faible
Facilité d'utilisation sur chantier	1	1	

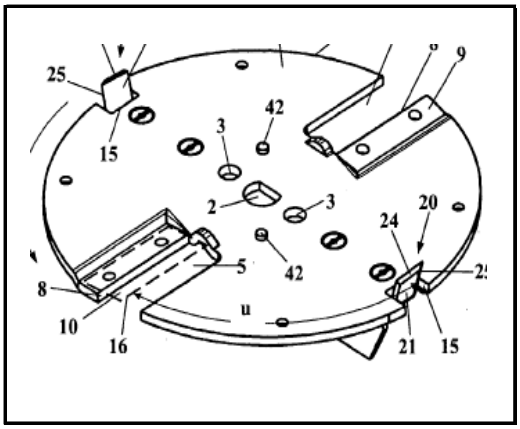
Observations:
La tronçonneuse apporte de la sécurité mais ne coupe pas suffisement rapidement (15m/s), le contact chaîne/guide empêche d'aller plus vite. Largeur de coupe élevé (12mm)

Total: **22**

4.2 Inventaire des outils de la filière accoroutage

Disque de coupe

Description, particularités: le disque constitue au porte outil pour monter des dents de toutes sortes



Mouvement:	Rotatif	
Mode de coupe:	A	
Vitesse de coupe:	45	m/s
Avance par dent:	X	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:	Le corps est souvent en aciers les dents interchangeables peuvent être en carbure.	

Utilisations connues:
Broyeurs de branches…

Fournisseurs connus:

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Technologies simples
Disponibilité	3	1	Beaucoup de fabricants
Facilité d'adaptation	3	1	Principe du lamier
Capacités de coupe	4	1	broie et coupe petites et grosses branches
Usure	3	1	dents carbures
Sécurité	2	1	dans l'axe de la route
Qualité de coupe	3	1	moyenne à bonne
Facilité d'utilisation sur chantier	2	1	risque de bourrage?

Observations:
Le disque rotatif peut être utilisé en bout de rotor pour couper ou broyer. Le principale avantage qu'il a est de couper les petites et les grosses branches.

Total: **23**

Sécateur

Description, particularités: Sur le principe de la cisaille de haies, déjà utilisé par NOREMAT. Ce n'est pas le vitesse qui coupe mais l'effort de cisaillement crée par les deux dents ou le dent et le contre couteau

Mouvement: Linéaire Alternatif

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: 60 à 5000 cycle/min

Avance par dent: X mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux: Le corps et les dents sont souvent en aciers

Utilisations connues:
Taillage des haies, paire de ciseaux. Barre de coupe de moissoneuses batteuse.

Fournisseurs connus:
STIHL, NOREMAT...

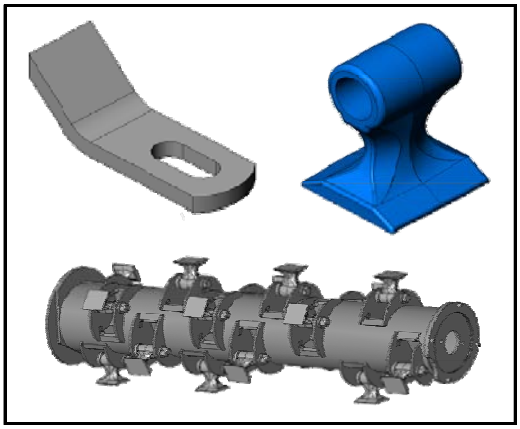
Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Principe et matériaux simple
Disponibilité	3	1	Déjà utilisé
Facilité d'adaptation	4	1	Déjà utilisé
Capacités de coupe	1	1	Faible vitesse d'avance 2 km/h
Usure	2	1	Dents en acier mais pas de chocs
Sécurité	3	1	Bonne
Qualité de coupe	4	1	Pas mieux à l'heure actuelle
Facilité d'utilisation sur chantier	4	1	Fiable et robuste

Observations:
Déjà utilisé dans le domaine, procure une coupe nette et propre. Le problème vient de la faible vitesse de coupe et donc d'avance. Il est possible d'augmenter facilement la fréquence des oscillation mais un risque d'augmenter les vibrations et de perdre en couple. Largeur de coupe très faible

Total: **24**

Marteaux et fléaux

Description, particularités: Le principe des marteaux est de les fixer via une liaison pivot à un rotor et d'utiliser leur inertie pour déchiqueter le bois.



Mouvement: Rotatif

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: 45 m/s

Avance par dent: X mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux: Les marteaux sont en fond ADI 1200, modifications eventuelles.(carbures?)

Utilisations connues:
Cette méthode de coupe est régulièrement utilisée dans le défibrage et le broyage des végétaux. Pour la coupe, la qualité est médiocre.

Fournisseurs connus:
FORGES DE GORCE
BARDON NOUVELLE FORGE SA
VAN BEEST BV
ARNO SARL
GOUVY
WILLIAM LEE LTD

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Prix du marteau faible mais celui du moule élevé
Disponibilité	3	1	Disponibilité/prix faible (en europe)
Facilité d'adaptation	4	1	Existe déjà
Capacités de coupe	3	1	Coupe efficace
Usure	2	1	Chocs et usures importants
Sécurité	1	1	Détachement de marteaux
Qualité de coupe	1	1	Très médiocre
Facilité d'utilisation sur chantier	3	1	Moyen

Observations:
Largeur de coupe: faible; Efficace mais travail de mauvaise qualité, nécessite de la puissance.

Total: **20**

Plateau rotatif

Description, particularités: Déjà utilisé dans le domaine, il s'agit de fixer sur un plateau rotatif des éléments coupant.

Mouvement:	Rotatif	
Mode de coupe:	A	
Vitesse de coupe:	jusqu'à 50	m/s
Avance par dent:	X	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:	Couteaux en acier, carbure. Fils en nylon, acier. Chaînes en aciers…	

Utilisations connues:
Coupe de haies et d'herbe…

Fournisseurs connus:
Kirogn pour la fabrication du lamier; SABRE France pour les lames de débrousailleuse et les rotofils…

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	4	1	Technologies et matériaux simples
Disponibilité	3	1	Idem
Facilité d'adaptation	4	1	Existe déjà
Capacités de coupe	2	1	Diam max des branches 2cm
Usure	2	1	Fil et lame s'use vite
Sécurité	1	1	Les couteaux risquent de partir dans l'axe de la route
Qualité de coupe	4	1	Sur de la petite branche très bonne
Facilité d'utilisation sur chantier	4	1	Pas de pb, attention au départ de couteaux

Observations:
Les couteaux, comme le fil effectuent une coupe franche mais sur des diamètres faibles (surtout les fils); les couteaux sont dangereux à cause des projections. Largeur de coupe: 5 mm. Il est également possible de monter une lame à ressort (brevet 81 08834) ou un lame à chaine (86 17170).

Total: **24**

4.3 Inventaire des outils divers

Jet d'eau haute pression

Description, particularités: Il s'agit d'utiliser la pression d'un fluide (généralement de l'eau ou de l'air avec ou sans adjonction d'abrasif) pour couper les branches.

Mouvement: Linéaire Alternatif

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: jusqu'à 5 m/s

Avance par dent: X mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux: Fluide: eau, air; Abrasif: sable

Utilisations connues:
Le jet d'eau s'utilise dans beaucoup de domaine comme la découpe de produits alimentaires, de polymères et depuis peu de bois.

Fournisseurs connus:
Le CRITT Jet d'eau à Bar le duc.

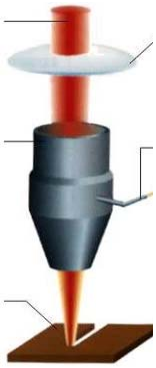
Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	1	1	Technologies de pointe
Disponibilité	2	1	Relativement implanté
Facilité d'adaptation	2	1	Facile à transporter
Capacités de coupe		1	Non encore déterminée
Usure	4	1	Pas d'outil juste une buse en diamant
Sécurité	4	1	La pression du liquide est rapidement perdue
Qualité de coupe	4	1	Si ça coupe, ça doit bien le faire…
Facilité d'utilisation sur chantier		1	Non encore déterminée

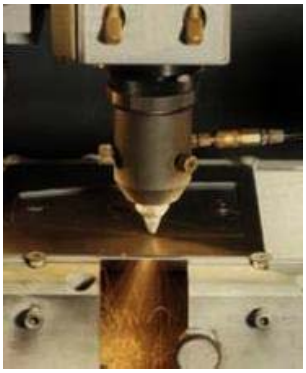
Observations:
La technologie jet d'eau est une technologie qui commence à bien fonctionner dans de nombreux domaines. Dans le notre, elle semble fonctionner facilement et rapidement pour les petits diamètres (1cm max). Elle impose aussi de transporter une citerne d'eau: 2 m3 environ. Mais largeur de coupe très faible (0,5mm).

Total: **17**

Découpe au LASER

Description, particularités: Utiliser la puissance d'un laser pour effectuer la découpe des branches





Mouvement: Linéaire Alternatif

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: m/s

Avance par dent: mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux:

Utilisations connues:
Découpe de bois, tissus, métaux.

Fournisseurs connus:

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	1	1	Technologies de pointe
Disponibilité	2	1	Relativement bien implanté
Facilité d'adaptation	2	1	Réalisable
Capacités de coupe		1	Non encore déterminées
Usure	5	1	Aucune pièces d'usure
Sécurité	3	1	Obligation de le mettre à la verticale (usagers)
Qualité de coupe		1	Non encore déterminées
Facilité d'utilisation sur chantier		1	Non encore déterminées

Observations:
Le laser est une technologie de pointe qui semble moins prometteuse que le jet d'eau, elle présente l'avantage de ne pas avoir de citerne à transporter. Par contre, il faut voir si la repousse des branches s'effectue correctement après une coupe au laser. Mais largeur de coupe très faible (0,5mm).

Total: **13**

Découpe par cable

Description, particularités: Sur le principe de la scie à ruban mais avec un cable linéaire muni d'abrasif

Mouvement:	Linéaire continu	
Mode de coupe:	A	
Vitesse de coupe:	25-30	m/s
Avance par dent:	0.5	mm
Sens de coupe:	Opposition	
Matériaux:	Cable support en acier et perles en diamant déposé par électrolyse	

Utilisations connues:
Découpe de pierre et d'acier

Fournisseurs connus:
DIAMANT BOART France pour les cables

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	1	1	Diamant polycristallin
Disponibilité	2	1	Dispo dans industrie pierre
Facilité d'adaptation	2	1	Simple d'utilisation
Capacités de coupe	2	1	Problème de bourrage
Usure	4	1	Diamant polycristallin
Sécurité	4	1	Cable
Qualité de coupe	2	1	Qualité surement médiocre sur du bois
Facilité d'utilisation sur chantier	2	1	Problème de bourrage

Observations:
Largeur de coupe 10 mm; Tension moyenne constatée du cable: 40 N/mm^2; Les problèmes de bourrage peuvent être dus à l'encrassement des perles abrasifs par les copeaux humides de bois.

Total: **19**

Rasoir à tambour

Description, particularités: Il s'agit d'un rotor qui coupe les poils grace à un contre couteau fixe.

Mouvement: Rotatif

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: m/s

Avance par dent: mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux: Souvent acier ou carbure

Utilisations connues:
Rasoirs électriques classiques…

Fournisseurs connus:
Gillette, Wilkinson…

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	2	1	Usinage, moulage de taille et de précision
Disponibilité	1	1	Outil non encore crée
Facilité d'adaptation	3	1	Principe simple: grosse lame de rasoir
Capacités de coupe	2	1	Indéterminée pour l'instant, surement bonnes
Usure	3	1	A voir, surement moyenne
Sécurité	4	1	Le tambour constitue un capotage sécurisant
Qualité de coupe		1	
Facilité d'utilisation sur chantier		1	

Observations:
Il s'agit plus d'un concept de coupe, qu'un outil utilisable directement. La réalisation devrait être couteuse et longue. Mais surement efficace et propre. Nécessité de puissance.

Total: **15**

Chaîne à dents

Description, particularités: On entend par chaine à dent un mélange entre le cable et la tronçonneuse. Il s'agit de fixer des dents sur une chaîne et de ne pas utiliser de guide.

Mouvement: Linéaire continu

Mode de coupe: C

Vitesse de coupe: possible 40 m/s

Avance par dent: 1,3 mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux:

Utilisations connues:
Pour l'instant peu d'utilisation connue puisqu'il s'agit de concevoir un nouvel outil. Peut être la chaîne à mortaiser.

Fournisseurs connus:
STIHL, LA FOREZIENNE

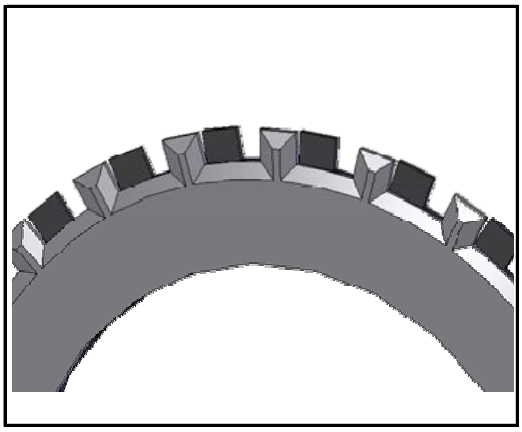
Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Brasage de plaquette sur une chaîne existante
Disponibilité	1	1	Outil non encore existant
Facilité d'adaptation	2	1	Technologie des vélo/moto
Capacités de coupe	4	1	Bonne pour le petit et le gros diamètre
Usure	3	1	Surement faible
Sécurité	4	1	Comme cable et tronconneuse
Qualité de coupe	3	1	Vitesse importante
Facilité d'utilisation sur chantier	3	1	Peut être risque de bourrage des branches

Observations:
Principe de la chaine de vélo: un brin tendu et un brin moux. Il faut couper sur le brin tendu. Largeur de coupe importante.(15mm environ)

Total: **23**

Outil de scisaillement rotatif

Description, particularités: On réutilise le principe du scisaillement (comme pour le sécateur). Mais cette fois la coupe est continue et rotative.



Mouvement: Rotatif

Mode de coupe: A

Vitesse de coupe: X m/s

Avance par dent: X mm

Sens de coupe: Opposition

Matériaux: Lame en acier, surement brasée de dents carbures ou stellites.

Utilisations connues:
A l'heure actuelle, pas d'utilisation connue.

Fournisseurs connus:

Critères	Notes (1-5)	C	Observations
Prix	3	1	Technologie simple
Disponibilité	1	1	Non encore existant
Facilité d'adaptation	2	1	Non encore existant
Capacités de coupe	3	1	Difficile pour les gros diamètres
Usure	3	1	Moyenne
Sécurité	2	1	Dans l'axe de la route mais faible vitesse de rotation
Qualité de coupe	4	1	Proche du sécateur
Facilité d'utilisation sur chantier	2	1	Risque de bourrage?

Observations:
Cet outil ne devrait pas tourner très rapidement (60 tr/min) mais surtout avoir du couple de scisaillement.

Total: **20**

Annexe 5. LES BROYEURS FORESTIERS

Durant la phase de choix du concept de coupe, nous nous sommes penchés sur les systèmes existants producteurs de plaquettes de chauffage. Parmi eux, le broyeur est l'un des plus importants. Le présent annexe décrit les tenants et les aboutissants de ces machines. Après un bref rappel des différents systèmes de coupe, nous en avons étudié les coûts et le marché. Les plaquettes pour le bois énergie sont fabriquées par déchiquetage de morceaux de bois (billons, branches…). L'opération de déchiquetage consiste à découper les plaquettes de bois et de les calibrer en partant des produits issus de l'abattage et du façonnage. Les déchiqueteuses (ou broyeurs) sont des machines possédant des outils en rotation qui hachent le bois. Un broyeur est caractérisé par plusieurs éléments constitutifs:

- Son outil de coupe
- L'alimentation en bois
- Sa capacité de broyage
- Sa capacité de production/sa puissance

Il existe plusieurs systèmes d'alimentation qui se différencient par la position de la trémie, par le dispositif d'entraînement des perches et par le mode d'alimentation. La trémie de chargement peut être latérale ou frontale par rapport à l'axe de progression de l'engin ou peut être mixte, c'est-à-dire réglable dans l'une ou dans l'autre des deux positions. En ce qui concerne l'entraînement du bois, peut se faire par rouleaux à picots ou dispositifs d'amenage à chaînes. Sur certaines machines, plus simples, une goulotte inclinée permet l'alimentation par gravité.

5.1 Les types de broyeur utilisés

Il existe plusieurs systèmes de coupe pour les déchiqueteuses : le disque rotatif à couteaux radiaux, les mono tambours, les bi tambours, les vis sans fin coniques, marteaux…

Figure 37 : De gauche à droite : Coupe par couteaux, par vis sans fin et par mono tambour

5.1.1 Les broyeurs à disque

Le disque comporte plusieurs couteaux disposés radialement et des orifices munis de "peignes" ou "éclateurs". Lors du passage d'un couteau au niveau de la branche à déchiqueter, une tranche est sectionnée sous l'effort de compression, elle traverse l'orifice en se fractionnant sur les éclateurs et ensuite éjectée dans la goulotte de la machine. Les copeaux sont éjectés par force centrifuge et par le

courant d'air produit par la rotation des pales fixées à l'arrière du disque. Ce dispositif se retrouve en général sur les machines de petites et de moyennes capacités. Cependant, de très gros modèles en sont aussi équipés et dans ce cas, le volant est très grand et très lourd, avec par exemple un diamètre de 170 cm pour une capacité de coupe de 50 cm. Ce sont les conditions de coupe qui déterminent la calibration des plaquettes : vitesse d'avance des rouleaux ameneurs, déport des couteaux, vitesse de rotation du disque, régulation de cette vitesse…

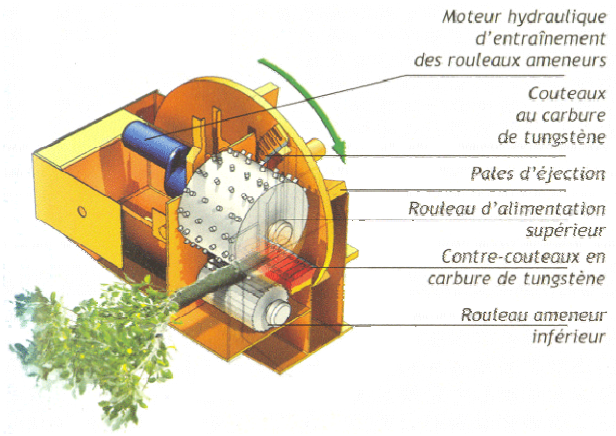

Moteur hydraulique d'entraînement des rouleaux ameneurs
Couteaux au carbure de tungstène
Pales d'éjection
Rouleau d'alimentation supérieur
Contre-couteaux en carbure de tungstène
Rouleau ameneur inférieur

Figure 38 : Broyeur à disque (NOREMAT)

5.1.2 Les broyeurs à tambour

Le tambour est un cylindre muni de couteaux, ou séries de couteaux, qui sont fixés sur toute la largeur du tambour (ou rotor). Le diamètre du tambour est inférieur à celui d'un disque porte-couteaux, à capacité identique. Le bois est tranché perpendiculairement au fil.

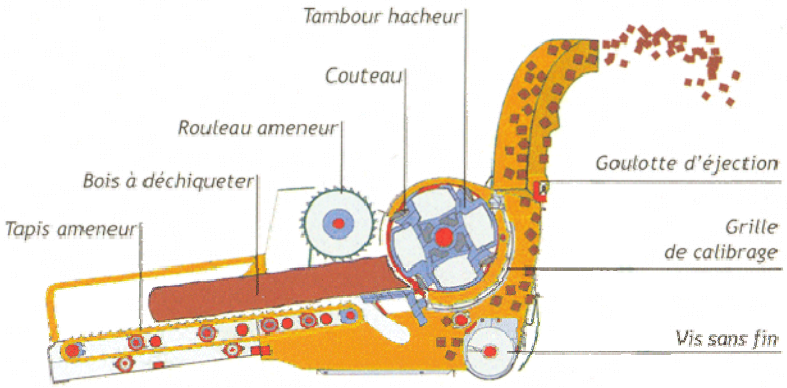


Figure 39 : Broyeur à tambour (NOREMAT)

La granulométrie désirée correspond au maillage d'une grille qui joue en quelque sorte le rôle de tamis et d'éclateur : les copeaux restent soumis à l'action du rotor tant qu'ils ne peuvent pas traverser cette grille, on limite ainsi les queues de déchiquetage. Suivant les fabricants, on retrouve des grilles de tailles et de formes différentes. Sur le concept du tambour, on trouve également des broyeurs dits « à fléaux » ou « à marteaux ». Les couteaux sont remplacés par des marteaux (ou des fléaux) peuvent pivoter librement autour leurs axes. Les marteaux défibrer le bois et les branchages à destination

du compostage, de l'épandage ou de la litière animale. Pour le bois énergie, les plaquettes produites sont de mauvaise qualité.

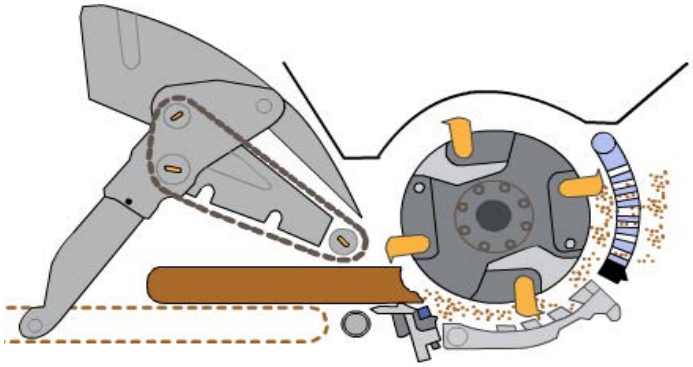


Figure 40: Tambour à marteaux (FORUS)

Les auteurs ne sont pas toujours décidés sur la meilleure technologie à adopter pour fabriquer de la plaquette de chauffage de qualité. Le broyeur à disque est souvent moins cher à l'achat que le tambour à capacité de production équivalente. Par contre, les coûts de production des deux sont difficiles à estimer. En ce qui concerne la granulométrie, la présence de grille de calibrage et l'inertie plus importante du tambour défavorisent le broyeur à disque.

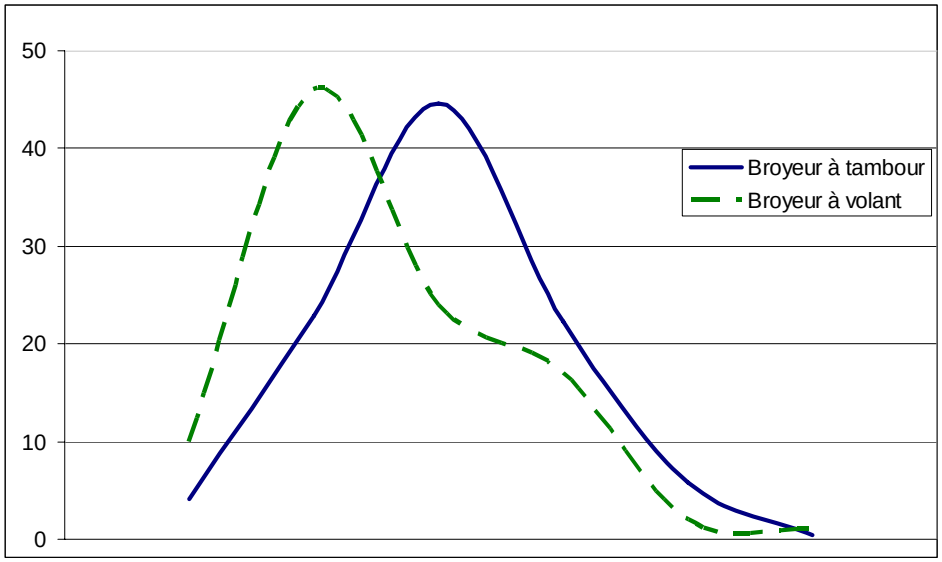


Figure 41 : Comparaison des allures granulométrique entre les broyeurs à tambours et à disque

Le graphe précédent montre la superposition des allures granulométriques. Le graphique précédent doit être pris de la manière suivante : on voit que la courbe granulométrique du broyeur à tambour est plus symétrique (plus gaussienne) ce qui est signe de plaquettes de dimensions homogènes. Ces courbes ont été obtenues en analysant deux produits de broyage de broyeurs de capacités similaires.

5.2 Tarifs et coûts pratiqués

Le broyage de branches en plaquettes est une opération à la fois coûteuse en énergie (énergie de broyage proprement dite) et en mains d'œuvre. Le coût de fabrication des petites plaquettes est supérieur à celui des grosses car il faut plus d'énergie pour réduire la granulométrie. Le coût de broyage des plaquettes, sans compter la main d'œuvre et le chargement, est de l'ordre de 15€/t (estimation basée sur l'expérience de certains producteurs). A cela, il convient de rajouter les frais de manutention et de transports pendant le broyage ainsi que le prix d'achat du bois.

Illustration (source : producteurs de plaquettes):

- Achat du bois rond : 15€/t
- Broyage : 15€/t
- Séchage/Manutention/Stockage: N.D.
- Prix de revente moyen : 60€/t

Les tarifs pratiqués pour ce genre de plaquettes ne subissent pas de règles particulières : ils dépendent surtout du contrat d'approvisionnement (durée du contrat, fréquence des livraisons, période des livraisons, volume des livraisons, qualité du combustible…) et sont donc très difficiles à mettre en place. A titre indicatif, le tarif moyen pratiqué par les producteurs et les sociétés d'approvisionnement pour les plaquettes forestières et bocagères est de 55€ la tonne de combustible à 30% d'humidité sur brut (source : Gouvernement). Alors, le prix en entrée de chaudière serait de 0,02 € TTC/kWh. A titre de comparaison, ce tarif est deux fois moins important que celui du fioul domestique :

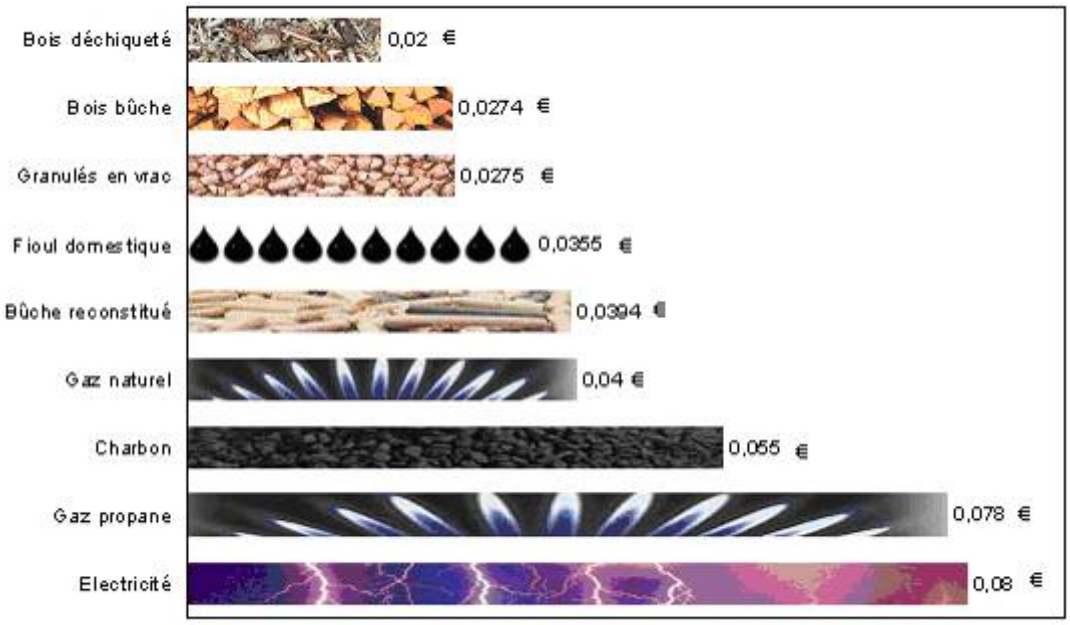


Figure 42 : Comparatif des tarifs des énergie en entrée de chaudière (2002) [ADEME]

Ces chiffres datent quelques peu et l'on peut aisément imaginer que l'écart entre les tarifs au kWh à l'entrée de la chaudière entre le pétrole et le bois n'a pas diminué.

5.3 Quels en sont les fabricants et pour qui ?

Les fabricants de plaquettes pour le particulier sont, en général, des entrepreneurs qui possèdent une ressource forestière importante et un broyeur de branches. La plupart débardent eux-mêmes les branches de la forêt (afin de réduire les coûts), broient et livrent aux particuliers et aux collectivités. Le bois qui est broyé est en général du bois rond issus d'éclaircies de forêt et du bois issus de la seconde transformation du bois. Possédant le bois, un producteur doit également posséder un broyeur capable de fabriquer de la plaquette de qualité. Il faut que celle-ci soit de granulométrie constante, sans queues de déchiquetage, que la plaquette soit proprement coupée et donc non arrachée. Généralement, ces fabricants font également d'autres produits dérivées (plaquettes de paillage, absorbants…) et d'autres combustibles (grosses plaquettes, bûches, granulés…). Ils stockent et sèchent le combustible avant de le vendre. Les particuliers qui choisissent une chaudière à petites plaquettes, le font en connaissant une filière d'approvisionnement en combustible fiable. Le combustible est alors vendu en plus faible quantité (vente au détail, sacs de 50L par exemple) et donc son prix est plus élevé (jusqu'à +50%, prix constaté). Les petites plaquettes, étant un excellent combustible, peuvent être utilisées dans toutes chaudières (à plaquettes, bien entendu…) et ce quelque soit la puissance. A cause de leur prix moins élevé, les grosses plaquettes sont préférées pour les grosses installations. A l'inverse, les chaudières de faibles puissances (<200 kW) n'acceptent que des petites plaquettes.

Annexe 6. ESSAIS PRELIMINAIRES D'OBSERVATIONS

Après avoir fait l'inventaire des outils de coupe de la filière bois, l'entreprise a voulu tester les outils de l'inventaire présents sur le site de l'ENSTIB. C'est pourquoi, plusieurs essais préliminaires ont été menés. Dans ces essais, nous retrouvons trois type d'outils : la scie à ruban pour la coupe simple, l'outil hélicoïdal et l'outil à enturer pour la coupe et le broyage.

6.1 Scie à ruban

Parmi les outils sélectionnés dans l'inventaire des outils de coupe, on trouve la scie à ruban. La scie à ruban est couramment utilisée dans la première transformation de l'industrie du bois, dans les scieries, et dans la deuxième, dans la menuiserie par exemple. Cette machine n'a encore jamais été utilisée dans le domaine de l'accoroutage et l'objectif de ces essais est d'en déterminer les possibilités. Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un scie à ruban présente dans le parc machine de l'ENSTIB. Juxtaposé à la scie, nous avons utilisé la table XY des essais avec l'outil de corroyage que nous avons monté sur un banc réglable en hauteur de manière à ce que les branches soient à la hauteur de coupe :

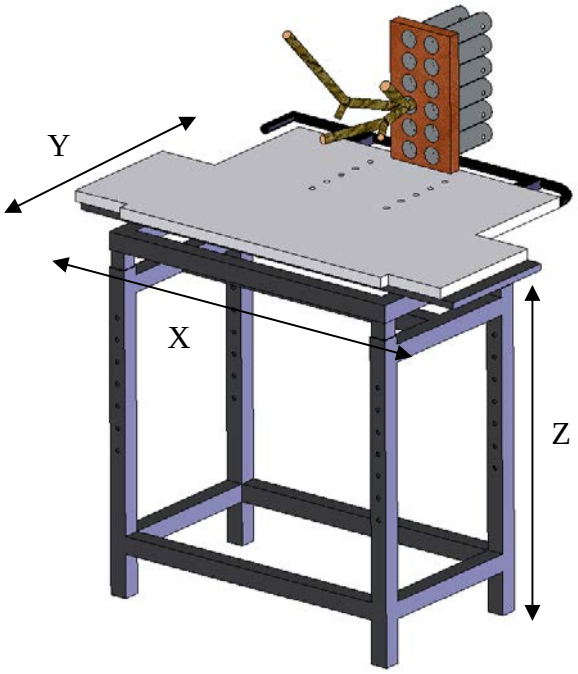


Figure 43 : Dispositif d'amenage réglable

La plate forme d'essais ressemble alors à cela :

Figure 44 : Installation mise en œuvre pour la réalisation des essais

Une des premières remarques est que la table « XYZ » a parfaitement fonctionné ce qui a permis de régler les paramètres de coupe au plus près de la réalité. Les difficultés que nous avons rencontrées lors de ces essais sont les suivantes :

- Tout d'abord, la tenue de la lame ruban est très délicate. En effet, ce type de lame est prévu pour une pièce de bois maintenue et dans le cas présent, l'arrivée des branches sur la lame provoque d'importantes vibrations sur celle-ci. Il est alors nécessaire d'augmenter le tensionnage de la lame malgré le risque de casse.
- La lame de scie à ruban ressemble beaucoup à la tronçonneuse déjà connue chez NOREMAT. Nous retrouvons donc les défauts de celle-ci, à savoir sa faible vitesse de coupe (30 m/s pour notre machine) et donc sa difficulté à couper les branches de faibles diamètres (inférieur à 8mm de diamètre). Celle-ci « sautillent » sur les dents de la lame et sont donc très mal coupées, même avec l'ajout d'un peigne.

Figure 45 : Exemple d'éclatement avec des coupes de 8mm

La solution de faire un fagot et donc de maintenir les branches les unes aux autres, n'étant pas plus efficace.

Figure 46 : Etat de surface de coupe d'un fagot de petits diamètres.

Par contre, nous possédons les avantages de la tronçonneuse, à savoir qu'elle coupe très bien les plus gros diamètres. Nous obtenons un résultat nettement supérieur à la tronçonneuse pour deux raisons : la coupe est plus fine (3 mm contre 15mm de largeur) et la vitesse de coupe plus importante (26 m/s contre 12m/s).

Figure 47 : Etat de surface obtenu sur les branches de diamètre 15mm

Afin de résumer l'efficacité de la scie à ruban face à d'autres systèmes :

Avantages	Inconvénients
Bonne qualité de coupe sur grosses branches	Mauvaise qualité de coupe sur les petites branches
Vitesse de coupe meilleure	Tenu de la lame, risque de casse
Epaisseur de coupe faible	Vitesse d'avance réduite
Faible énergie dépensée	Coupe uniquement, pas de broyage

En perspective, la scie à ruban est un outil intéressant de part sa qualité de coupe mais demande à être amélioré.

6.2 Outil hélicoïdal

6.2.1 Mise en place

Nous avons utilisé une toupie traditionnelle présente à l'école. La table d'usinage de cette toupie c'est vu ajouter une table dite « X-Y » comme pour les essais de la scie à ruban :

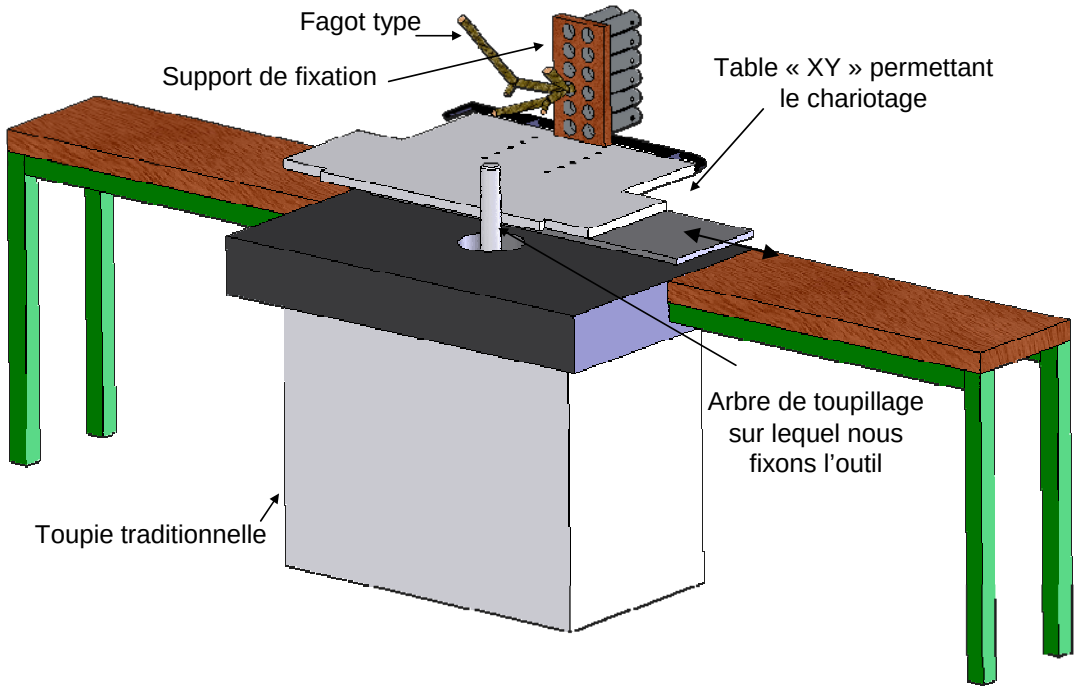

Fagot type
Support de fixation
Table « XY » permettant le chariotage
Arbre de toupillage sur lequel nous fixons l'outil
Toupie traditionnelle

Figure 48 : Dispositif de montage pour tester le rotor à couteau

La toupie a été réglée sur une vitesse de rotation de 3000 tr/min et les branches avançaient à une vitesse d'amenage de 2 km/h (vitesse approximative). L'outil qui a été utilisé pour couper les branches est un outil de corroyage à plaquettes rapportées hélicoïdales de 150 mm de hauteur de coupe et de 120 mm de diamètre. Cet outil n'est en aucun cas un outil étudié pour la coupe de branche en bois de bout. La version idéale pour nos tests aurait une forme et des caractéristiques différentes.

Figure 49 : Type d'outil utilisé pour simuler un rotor à couteau

6.2.2 Observations des branches coupées

Même en utilisant les conditions idéales d'usinage, l'outil hélicoïdal tel qu'il est fait actuellement est prometteur mais présente une marge de progression très importante. Cet outil ne présente pas actuellement un état de surface satisfaisant pour la capacité de coupe qu'il possède. En effet, quelque soit la prise de passe que l'on prend, l'outil transforme la quasi-totalité en copeaux. Les petites branches se coupent moins bien que les plus grosses au sens ou elles se plient autour de l'outil et la totalité de la prise de passe n'est pas coupée :

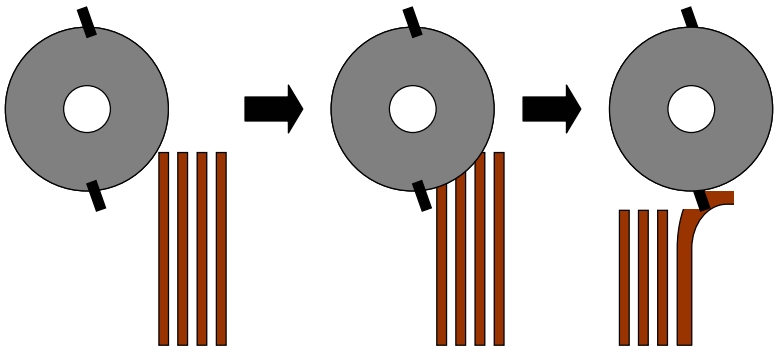


Figure 50 : Etapes de coupe des petites branches

De ce fait les gerbes de branches possèdent, une fois coupées, des formes en biseau :

Figure 51 : Coupe en biseau due à la flexion de branches

Pour les grosses branches, leur résistance à l'outil étant plus importante, un autre phénomène peut s'observer : on a une bonne coupe sur la première moitié de l'épaisseur de la branche, puis l'outil provoque un éclat important de la moitié qui reste. Cette observation ce fait sur la quasi-totalité des branches passées devant l'outil :

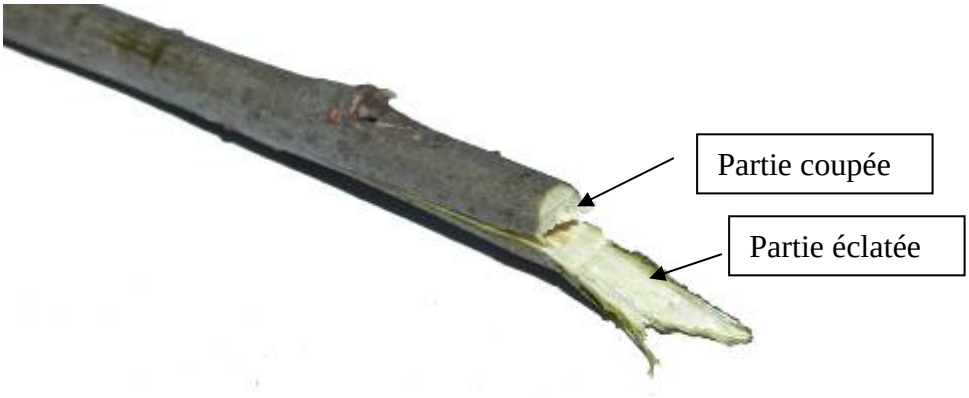


Figure 52 : Illustration des deux moitiés de branches coupées : l'une coupée l'autre éclatée

Certaines branches sont quand même mieux coupées, réduisant la partie éclatée pour privilégier la partie coupée. Mais cette qualité de coupe reste non satisfaisante pour respecter l'esthétique générale des haies françaises.

Figure 53 : Branche plutôt bien coupée

Pour conclure, nous avons pu réunir les avantages et les inconvénients de ce type d'outil :

Avantages	Inconvénients
Forte capacité de coupe	Mauvaises qualités de coupe
Branches transformées en copeaux	Coupe bruyante avec projection

Ne perdons pas de vue qu'il s'agit d'un outil de corroyage et en aucun cas d'un outil étudié pour l'élagage de branche. Par contre, il est clair qu'il possède des qualités indéniables : il s'agit d'un outil qui coupe et broie en une seule opération avec une forte capacité.

6.3 Outil à enturer

6.3.1 Mise en place

L'installation des essais a été effectuée de la même manière que pour les essais de l'outil à corroyer. Dans le cas présent, l'outil testé est un outil à enturer. L'enturage est une technique d'assemblage

traditionnelle dans le domaine du bois qui consiste à assembler deux pièces en « profil contre-profil ». Ce profil spécifique est appelé enture et possède une forme particulière :

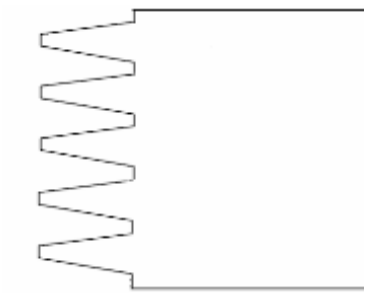


Figure 54 : Profil d'une enture pour l'aboutage

Pour réaliser ce genre de profil nous utilisons un outil spécifique :

Figure 55 : Montage de l'outil à enturer sur l'arbre de la toupie d'essais

L'outil à enturer est un outil conçu pour l'aboutage de pièces de bois les unes aux autres, c'est pourquoi il est étudié pour l'usinage en bois de bout. C'est ce qui ma donné l'idée de l'essayer sur les branches. Les angles pratiqués sur ce genre d'outil sont particuliers : l'angle de bec (β) est important pour la solidité de la dent qui est fortement sollicitée. Le travail en bois de bout autorise un angle d'attaque faible. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de rotation de 5000 tr/min et une vitesse d'avance de 2km/h sur des branches d'un diamètre allant de 1 à 5 cm.

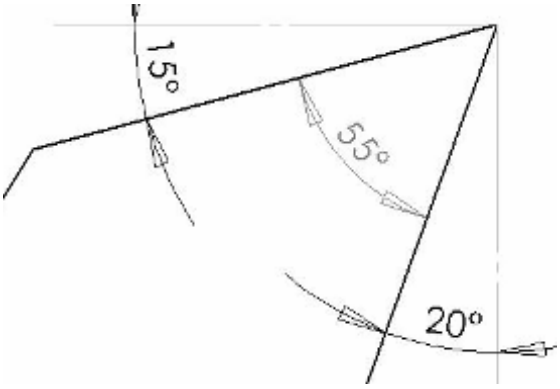


Figure 56 : Angles de coupe utilisés sur l'outil à enturer

6.3.2 Observations

L'une des premières choses qui frappe lorsque l'on effectue les premiers tests est la facilité d'usinage : en effet, l'outil rogne la branche facilement sans la frapper, de sorte que celle-ci sautille peu sur l'outil (c'était une des principales causes de mauvaises coupe avec les autres outils). La forme des dents est conçue de telle façon à ce que la surface d'usinage soit importante, les efforts sont ainsi répartit correctement :

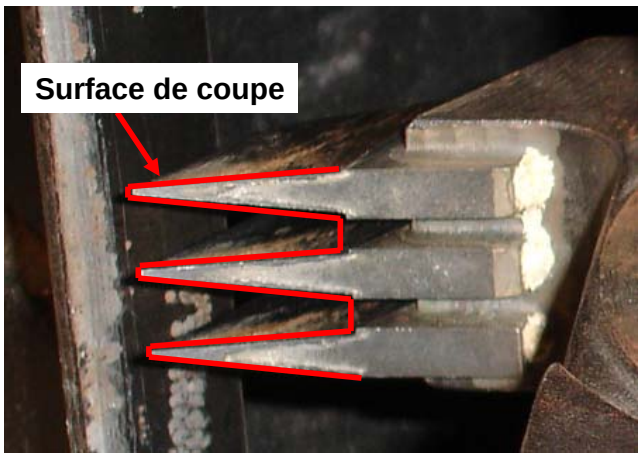


Figure 57 : Déplié de la surface de contact bois/outil

L'inconvénient de ce type d'outil est qu'il doit produire un profil enturé et non une surface plane, c'est pourquoi l'état de surface des branches obtenu est quelque peu original :

Figure 58 : Etat de surface d'une branche obtenue par l'outil à enturer

Cet état de surface n'est bien sur pas acceptable à laisser sur bord de route mais peut être solutionné par l'ajout de dents judicieusement placées sur l'outil. Les copeaux formés par l'usinage se rapprochent plus de la sciure que de plaquettes calibrées mais cela peut être amélioré par des formes de dents et des paramètres d'usinage appropriés. L'usinage s'effectue parallèlement aux fibres du bois (comme une fendeuse de bûche) et les efforts sont nettement moins importants. Cette facilité d'usinage entraîne une baisse significative des vibrations des branches. On peut espérer améliorer l'état de surface en alternant des couteaux droits et des couteaux à enturer. De cette façon, le couteau droit n'aura qu'à enlever les entures formées par la dent précédente.